

621.9
P82

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 621.9.048.6:534.014.5

РУБАНИК ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

**НОВЫЕ СПОСОБЫ И ТЕХНОЛОГИИ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность

05.03.01 – технологии и оборудование механической
и физико-технической обработки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Минск 2005

Работа выполнена в ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси» и Витебском государственном технологическом университете

Научный консультант академик НАН Беларуси, лауреат государственной премии Беларуси, доктор технических наук, профессор, **Клубович В.В.**, главный научный сотрудник ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **Здор Г.Н.**, директор Научно-исследовательского и конструкторско-технологического института сварки и защитных покрытий с опытным производством, Минск

академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор **Прохоренко П.П.**, главный научный сотрудник ГНУ «ИПФ НАН Беларуси», г. Минск

доктор технических наук, профессор **Кундас С.П.**, директор эколого-

вский уни-

заседании
вский ин-
г. Минск,
етарь со-

«Физико-

В.А.

*глубокоуважаемого и
Валерию Степановичу и
искренней благодарности за
признательности в том числе
содержимые в Вашем письме
Буду рад Вашему проекту
защиты*

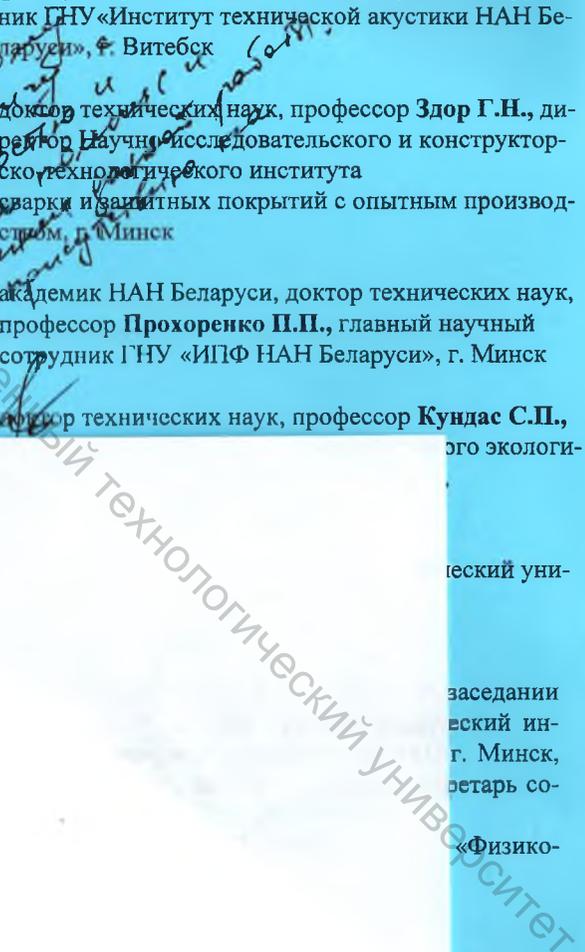
Оппониру-
ция

Защ
совета по
ститут На
ул. Купре
вета), фак
С д
техническ

Авт

Ученый со
по защите
доктор тех

В.А.



Витебский государственный технологический университет

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

В настоящее время энергия ультразвуковых колебаний (УЗК) широко используется для интенсификации различных технологических процессов. Это сварка пластмасс, финишная поверхностная обработка, обработка давлением и др. Однако, в силу специфики ультразвукового воздействия, для каждого конкретного технологического процесса необходима разработка способов и устройств подвода энергии УЗК к очагу деформации, обеспечивающих максимальную эффективность ультразвукового воздействия.

Получение широко используемых в ядерной энергетике, авиационной и космической технике, в линиях связи кабелей в металлической оболочке с минеральной изоляцией и изделий на их основе связано со значительными технологическими трудностями как при заполнении исходной заготовки мелкодисперсным изолирующим порошком и её волочении, так и при разделке кабеля малого диаметра. Наличие порошкового материала изменяет схему напряженно-деформированного состояния и не позволяет осуществлять процесс совместного пластического деформирования разнородных материалов с единичными обжатиями более 12-15% и скоростями более 12-20 м/мин. Увеличение единичных обжатий и скорости волочения приводит к обрывам внутренних жил. При волочении термопарного кабеля с минеральной изоляцией (КТМС) и нагревостойкого (КНМС) после каждого перехода осуществляют термообработку в водородных проходных печах со скоростью протяжки до 2,5 м/мин, т.е. значительно меньшей скорости волочения. Кроме того, при рекристаллизационном отжиге после критических степеней деформации в материалах оболочки и электропроводящих жил происходит аномальный рост зерен, затрудняющий последующую деформацию. Поэтому использование скоростного отжига и ультразвука при получении кабелей в металлических оболочках с минеральной изоляцией является оправданным и перспективным.

Необходимость получения тонких, диаметром 0,5 мм и меньше, свинцово-оловянистых припоев с равномерным распределением канифоли по длине обусловлена автоматизацией процессов пайки в радиоэлектронной промышленности и ее общей микроминиатюризацией. В практике промышленного производства припой диаметром до 3 мм получают прокаткой. Для получения более тонких припоев используют однократное волочение с единичным обжатием 5÷7 %. Применение многократного волочения со скольжением, а также УЗК позволит интенсифицировать процесс получения проволоки микронных размеров с наполнителем из канифоли.

Весьма перспективным является использование ультразвука при прессовании порошковых материалов и для инициирования эффектов памяти формы (ЭПФ) в сплавах, претерпевающих термоупругие, магнитные превращения.

Однако следует учитывать и экономическую целесообразность использования ультразвука при обработке различных по свойствам материалов. Применение УЗК оправдано только в тех случаях, когда другими способами осуществить или интенсифицировать процессы обработки материалов невозможно или малоэффективно. При этом необходимо учитывать, что при волочении с наложением ультразвуковых колебаний усилия волочения зависят от скорости волочения. Поэтому необходимо в каждом конкретном случае проводить оптимизацию маршрута волочения. Целесообразно использование УЗК в сочетании с другими энергетическими воздействиями, например, тепловыми, так как при этом возрастает эффективность их применения.

Разработка технологических процессов волочения, термообработки, прессования с УЗК с целью достижения их максимальной экономичности и эффективности требует рационального конструирования ультразвукового оборудования, определения оптимальных технологических режимов обработки, создания новых схем подвода ультразвуковых колебаний к очагу деформации, глубокого проникновения в физическую сущность процесса, понимания его механизма. В этой связи работа, направленная на решение вышеперечисленных задач, является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

Связь работы с крупными научными программами, темами.

Научные исследования по теме диссертации проводились в рамках республиканских комплексных программ по заданиям: “Исследование механизма воздействия ультразвуковых колебаний на твёрдые тела”, № ГР 78003137, 1977-1980 г.г.; “Исследование новых процессов обработки материалов при наложении ультразвуковых колебаний”, № ГР 81014261, 1981-1985 г.г.; “Разработка теоретических и технологических основ создания высокоэффективных ультразвуковых и электромагнитных методов и оборудования для получения и обработки новых материалов и изделий из них в радиоэлектронике, машиностроении и др. отраслях промышленности”, № ГР 01860092417, 1986-1990 г.г.; “Исследование влияния концентрированных потоков энергии на процессы обработки металлов давлением, термической и поверхностной обработки и синтеза материалов”, № ГР 01910027797, 1991-1995 г.г.; “Исследование термического и ультразвукового воздействия на свойства многофазных материалов и процессы полировки сверхтвёрдых материалов”, 1996-2001 г.г.; ГПФИ Материал 52 “Исследование процессов пластической деформации и термического воздействия с наложением ультразвуковых колебаний на механические и термоупругие свойства материалов с эффектом памяти формы на основе Ti-Ni сплавов”, № ГР 199862; ГПОФИ Материал 1.20 “Разработка теории, методов создания и обработки материалов различного функционального назначения с улучшенными физико-техническими свойствами с применением мощного ультразвука”, № ГР 20021948; Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований “Исследование физических закономерностей и механизмов воздействия мощных ультразвуковых и тепловых полей на фазовые превращения мартенситного типа в сплавах, обладающих эффектом

памяти формы на основе никелида титана”, № ГР1997534; ”Исследование особенностей проявления эффекта снижения напряжения пластического течения в сплавах на основе никелида титана при наложении ультразвуковых колебаний”, № ГР20003107; Соглашений о научно-техническом сотрудничестве с НИИ математики и механики им. акад. В.И. Смирнова Санкт-Петербургского государственного университета (№ 342 от 3.04.2001 г.), НТФ «Вольта» (Санкт-Петербург, № 908 от 7.12.1999 г.), ЗАО «Промышленный центр МАТЭКС» (Москва, № 3п-10/04 от 27.10.2004 г.).

Цель и задачи исследования. Целью работы является исследование закономерностей совместного пластического деформирования разнородных материалов, сплавов с эффектом памяти формы и разработка на их основе новых способов, технологий и оборудования для формообразования изделий с использованием ультразвуковых колебаний.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие основные задачи:

- разработать научные и технологические основы совместного пластического деформирования разнородных материалов, а также сплавов с эффектом памяти формы с наложением УЗК;
- исследовать и разработать новые способы подведения УЗК к очагу деформации при волочении, термообработке, заполнении и прессовании порошковых материалов, разделке кабелей с минеральной изоляцией и металлической оболочкой;
- исследовать влияние УЗК на основные технологические параметры процесса волочения и физико-механические свойства проволоки при использовании скоростного электроконтактного нагрева (ЭКН) и отжига с УЗК;
- разработать методику расчёта температуры проволоки и кабелей с минеральной изоляцией при скоростном ЭКН, методику оптимизации маршрута ультразвукового волочения;
- разработать процессы ультразвуковой засыпки порошка при изготовлении кабелей с минеральной изоляцией и ультразвуковой разделки кабеля;
- разработать математическую модель процесса волочения свинцово-оловянистого припоя с наполнителем из канифоли с наложением продольных УЗК;
- исследовать и разработать технологию волочения свинцово-оловянистого припоя с постоянными и переменными обжатиями по переходам на станах со скольжением и с наложением УЗК;
- исследовать и разработать способы инициирования эффектов мартенситной неупругости с помощью УЗК в сплавах с эффектом памяти формы;
- разработать комплекс технологического оборудования и измерительной аппаратуры для формообразования с УЗК изделий из разнородных материалов, сплавов с эффектом памяти формы и внедрить их в производство.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются технологические процессы формообразования изделий из разнородных материалов и сплавов с эффектом памяти формы с применением УЗК.

Предметом исследования диссертационной работы являются закономерности влияния ультразвука на параметры технологических процессов формообразования и свойства изделий.

Гипотеза. Использование в технологических процессах изготовления изделий из разнородных материалов и сплавов с эффектом памяти формы энергии УЗК позволит в широких пределах изменять основные технологические параметры процессов формообразования и свойства изделий.

Методология и методы проведенного исследования. Методология представленной работы заключается в комплексном анализе теоретических и экспериментальных данных о технологических процессах ультразвуковой обработки. Теоретическая часть диссертационной работы выполнена с использованием основных положений теории пластичности и обработки металлов давлением. Решение поставленных в работе задач осуществлялось с помощью следующих методов проведения исследований: рентгеноструктурного анализа; оптической металлографии; инфракрасной термографии; дилатометрического анализа; испытаний изделий на кручение, изгиб и растяжение; рентгенорадиометрического анализа химического состава материалов; голографической интерферометрии; компьютерного моделирования с использованием современного программного обеспечения.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Научная новизна работы заключается в развитии теории и технологических основ совместного пластического деформирования разнородных материалов и сплавов с эффектом памяти формы с использованием УЗК как на базе разработанных математических моделей исследуемых процессов, так и путем экспериментального определения закономерностей их протекания.

Основные результаты, определяющие научную новизну диссертационной работы, состоят в следующем:

– Развита представления о совместном пластическом деформировании разнородных материалов, сплавов с эффектом памяти формы при наложении УЗК. Получены аналитические выражения для расчёта максимальной температуры нагрева проволоки и кабеля с минеральной изоляцией при скоростной электроконтактной обработке на проход, усилий волочения свинцово-оловянистого припоя с наполнителем, усилий деформирования через разъемную волоку с наложением УЗК.

– Установлены закономерности протекания процессов деформирования при волочении проволоки с ЭКН и наложением УЗК, что позволило обрабатывать труднодеформируемые материалы, повысить скорость протягивания и единичные степени деформации за проход.

– Установлены основные закономерности и особенности процесса ультразвукового волочения свинцово-оловянистых припоев вплоть до $\varnothing 0,4$ мм с использованием волноводов-волокон.

– Предложен и научно обоснован новый способ волочения свинцово-оловянистого припоя с переменным обжатием по переходам на станах со скольжением, разработана методика определения переменных единичных обжатий по переходам, установлено влияние параметров процессов волочения и нагрева на характер изменения физико-механических свойств изделий.

– Установлены основные закономерности скоростного отжига стальной проволоки при электроконтактном нагреве. Показано, что ультразвуковое воздействие приводит к снижению температур отжига и формированию в микроструктуре сталей большего количества феррита, к более равномерному распределению ферритных и перлитных частиц по объему металла.

– Установлены особенности термической обработки с ЭКН проволоки из стали 12Х18Н10Т и никеля НП-2 после малых и критических степеней деформации. Показано, что при воздействии УЗК повышение пластических свойств проволоки при отжиге происходит при более низких температурах нагрева, устраняются разнородность и аномальный рост зёрен.

– Предложен и научно обоснован новый способ волочения нагревостойкого кабеля с наложением УЗК. Показано, что величина снижения усилия волочения зависит от вида применяемой смазки, схемы подведения колебаний к очагу деформации. Разработана схема ввода УЗК в очаг деформации, исключая возникновение в кабеле изгибных колебаний, что обеспечивает волочение без обрыва внутренних жил. Определены оптимальные технологические режимы скоростной электроконтактной термообработки кабеля на проход.

– Установлены основные закономерности поведения функционально-механических свойств сплавов с памятью формы при ультразвуковом воздействии. Впервые показана возможность генерации эффекта памяти формы и реактивных напряжений только за счет энергии УЗК. Предложена модель, объясняющая эффекты ультразвукового воздействия на функциональные свойства сплавов с памятью формы, в частности, возрастание напряжения течения («аномальный» акустопластический эффект).

Практическая (экономическая, социальная) значимость полученных результатов заключается в:

– разработке процессов, оборудования и технологий формообразования кабелей в металлических оболочках с использованием УЗК, включающих заполнение заготовки минеральной изоляцией, волочение, электроконтактный отжиг и разделку готового кабеля для изготовления первичных термопреобразователей. Оборудование и технология получения кабеля внедрены на ОАО «Кирсенский кабельный завод» (г. Кирс, Кировской обл.). Годовой экономический эффект составил 621,3 тыс. рублей, в ценах 1988 г.;

– разработке технологии совмещенного скоростного отжига и волочения стальной проволоки с использованием ЭКН и УЗК. Технология внедрена на предприятии п/я А-1429 (г. Пенза), с годовым экономическим эффектом 25,28 тыс. рублей, в ценах 1989 г.;

– разработке технологии получения тонкой проволоки из сплава Д16 с наложением УЗК, внедренной на Витебском заводе электроизмерительных приборов с годовым экономическим эффектом на единицу оборудования 14 060 рублей, в ценах 1989 г.;

– разработке процесса, оборудования и технологии многократного волочения одно- и пятиканального трубчатого оловянно-свинцового припоя и внедрении их на Рязанском заводе по производству и обработке цветных металлов с годовым экономическим эффектом 150 млн. рублей, в ценах 1993 г.;

– разработке оборудования для перемотки и счета длины вольфрамовой и молибденовой проволоки и внедрении его на Брестском электроламповом заводе с годовым экономическим эффектом 178 тыс. рублей, в ценах 1992 г.;

– разработке новых способов инициирования эффектов мартенситной неупругости, нашедших практическое применение при волочении и термообработке проволоки из сплава TiNi на промышленном центре МАТЭКС (г. Москва) с годовым экономическим эффектом 3,2 млн. руб. рублей, в ценах 2005 г.

Фактический суммарный экономический эффект от внедрения разработок составляет более 650 тысяч у.е. в год.

Результаты работы используются в учебном процессе УО «ВГТУ» на кафедрах «Физика» и «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки» (курс лекций, практические занятия, курсовое и дипломное проектирование).

Практическая значимость работы подтверждается 31-им авторским свидетельством, 4-мя патентами Республики Беларусь и 3-мя патентами РФ на изобретения.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные положения работы:

– новые представления о совместном пластическом деформировании разнородных материалов, сплавов с эффектом памяти формы при наложении УЗК, методики расчёта максимальной температуры нагрева проволоки и кабеля с минеральной изоляцией при скоростной электроконтактной обработке на проход, усилий волочения свинцово-оловянистого припоя с наполнителем, усилий деформирования через разъемную волоку с наложением УЗК;

– новые способы ультразвукового воздействия при волочении, термообработке, заполнении изоляционным порошком и разделке кабельных изделий, прессовании порошковых материалов, инициировании эффектов мартенситной неупругости;

– результаты исследований влияния ультразвуковых колебаний на технологические параметры процессов волочения, термообработки, прессования изделий, а также на их физико-механические свойства;

– новые способы и устройства деформации металлов и сплавов в ультразвуковом поле с использованием электроконтактного нагрева, результаты исследований свойств полученных материалов и изделий из них;

– математическая модель, научное обоснование и установленные закономерности процесса волочения свинцово-оловянистых припоев с постоянными и переменными обжатиями по переходам на станах со скольжением;

– обнаруженные явления и модель ультразвукового инициирования эффектов мартенситной неупругости в сплавах с памятью формы;

– технологические процессы изготовления свинцово-оловянистых припоев, кабелей в металлических оболочках с минеральной изоляцией, проволоки из различных материалов с наложением УЗК, результаты их внедрения в производство.

Личный вклад соискателя. Теоретические и экспериментальные исследования, обобщенные в представленной работе, выполнены автором как самостоятельно, так и в соавторстве. При этом автору принадлежит постановка проблемы в целом и задач экспериментальных исследований; разработка основных методик проведения экспериментов и обработки результатов; научное руководство и непосредственное участие в экспериментах, включая обработку результатов и их интерпретацию; разработка схем ввода ультразвуковых колебаний в очаг деформации; написание большинства статей, тезисов докладов, отчетов и описаний к авторским свидетельствам и патентам.

Совместными с соавторами являются научно-производственные результаты, связанные с выполнением госбюджетных заданий и проектов, хозяйственных НИР, работ по договорам о научно-техническом сотрудничестве, где автор являлся ответственным исполнителем или научным руководителем.

Большая часть работ выполнена в соавторстве с научным консультантом профессором, доктором технических наук, академиком НАН Беларуси Клубовичем В.В., который осуществляет общее стратегическое руководство всей тематикой, связанной с ультразвуком.

Апробация результатов диссертации. Материалы, вошедшие в диссертационную работу, доложены и обсуждены на зональной конференции “Электрофизико-химические и комбинированные методы обработки металлов” (Пенза, 1984 г.); Международном симпозиуме “Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения” (Киев, 1984 г.); VI ВНТК по ультразвуковым методам интенсификации технологических процессов (Москва, 1987 г.); НТК «Прогрессивные процессы обработки материалов давлением» (Минск, 1985 г.); Международных конференциях “Tvarnenie visokumi parametrami – tehnologie tvarnenia” (Братислава, 1986 г.); зональной конференции “Автоматизации процессов обработки металлов давлением” (Пенза, 1986 г.); III Всесоюзной конференции “Актуальные проблемы получения и применения сегнето- и пьезоэлектрических материалов и их роль в ускорении научно-технического прогресса” (Москва, 1987 г.), Всесоюзном семинаре “Пластическая деформация материалов в условиях внешних энергетических воздействий” (Москва, 1987 г.).

ческих воздействий” (Новокузнецк, 1988 г.); V Дальневосточной акустической конференции “Акустические средства исследования океана” (Владивосток, 1989 г.); Всесоюзном симпозиуме “Методы и применение голографической интерферометрии” (Самара, 1990 г.); VI Всесоюзной конференции по голографии (Витебск, 1990 г.); МНТК “Тенденции развития технологии машиностроения” (Польша, Зелена Гура, 1990 г.); МНТК “Ультразвук в технологии машиностроения” (Архангельск, 1991 г.); конференции «Повышение эффективности и качества механообрабатывающего производства» (Евпатория, 1993 г.), Международной конференции “Колебания и волны в экологии, техпроцессах и диагностике” (Минск, 1993 г.); World Congress on Ultrasonics, (Berlin, 1995); МНТК “Ультразвуковая техника и технология” (г. Минск, 1995 г.); I Российско-Американском семинаре «Материалы с эффектом памяти формы» (Санкт-Петербург, 1995 г.); постоянных межгосударственных семинарах (1995 – 2002 гг.) и международных конференциях (с 2004 г.) «Актуальные проблемы прочности» (Санкт-Петербург, 1995 г., 1996 г.; Тамбов, 1998 г.; Псков, 1999 г.; Витебск, 2000 г., 2004 г.; Киев, 2001 г.; Великий Новгород, 2002 г.; Калуга, 2004 г.); International symposium “Acoustoelectronics, frequency control signal generation” (Moscow, 1996); II Международной конференции «Shape Memory and Superelastic Technologies: Engineering and Biomedical Applications» (Asilomar, Pacific Grove, CA, USA, 1997 г.); НТК «Физика и техника ультразвука» (Санкт-Петербург, 1997 г.); НТК «Ультразвуковые технологические процессы – 98» (Москва, 1998 г.), 51 и 53 МНТК БГПА «Технические вузы – республике» (Минск, 1995 г., 1999 г.); Международном симпозиуме «Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Industrial Applications» (Quebec, Canada, 1999 г.); НТК преподавателей и студентов УО «ВГТУ» (Витебск, 2002 г., 2004 г.); 4 Республиканской НТК «Материалы и технологии – 2000» (Гомель, 2000 г.), 7 European Conference on Advanced Materials and Processes EUROMAT 2001 (Rimini-Italy, 2001); International conference on martensitic transformations ICOMAT’02 (Helsinki, Finland, 2002); Всероссийской конференции «Дефекты структуры и прочность кристаллов» (Черноголовка, 2002 г.), XIV Петербургских чтениях по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 2003 г.); VI Международном симпозиуме «Современные проблемы прочности» (Старая Русса, 2003 г.), International conference «Shape memory and superelastic technology SMST-2004» (Baden-Baden, Germany, 2004).

Опубликованность результатов. Основные результаты диссертаций опубликованы в 133 научных работах, в том числе: 1 монографии, 15 статьях в научных рецензируемых журналах, 6 статьях в сборниках научных трудов, 18 статьях в сборниках материалов конференций, 16 депонированных рукописях, 33 тезисах докладов, 6 информационных листках, 31 авторском свидетельстве, 4 патентах на изобретения Республики Беларусь и 3 патентах на изобретения РФ. Общий объем опубликованных материалов составляет 756 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, семи глав, заключения, выводов, списка использованных источников и приложения. Работа изложена на 316 страницах, включая 166 иллюстраций на 106 страницах, 7 таблиц на 4 страницах, списка использованных источников из 310 наименований на 25 страницах и 8 приложений на 8 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор темы диссертации, представлена оценка современного состояния решаемой проблемы, показана ее научная и практическая значимость.

В общей характеристике работы раскрыта актуальность темы диссертации, показана связь работы с крупными научными программами, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая и экономическая значимость полученных результатов. Приведены основные положения диссертации, выносимые на защиту, показан личный вклад соискателя, полнота апробации и степень опубликованности результатов исследований, структура и объем диссертации.

В первой главе дан краткий аналитический обзор литературы по влиянию УЗК на физико-механические свойства материалов, возможности использования УЗК в процессах пластической деформации и термообработки.

Впервые ускорение ползучести под действием механических колебаний наблюдал Л.Арчбат. Затем Ф.Блага и Б.Лангенекер установили снижение напряжения, необходимого для протекания пластической деформации при воздействии УЗК. В настоящее время установлено, что с увеличением скорости деформации статическое напряжение снижается на меньшую величину, причем существует пороговое значение амплитуды напряжений, обусловленных УЗК, при достижении которой характер движения дислокаций становится необратимым, происходит отрыв их от точек закрепления. Снижение статического напряжения под действием УЗК различные исследователи объясняют наложением на статические переменных напряжений, изменением дислокационной структуры, уменьшением сил трения между обрабатываемой заготовкой и поверхностью инструмента, нагревом материала в результате поглощения акустической энергии. Более эффективное действие ультразвука по сравнению с нагревом при уменьшении предела текучести объясняется тем, что энергия УЗК поглощается на неоднородностях кристаллической структуры (дислокации, границы зерен, точечные дефекты и др.). Для деформации с наложением УЗК характерно увеличение плотности дислокаций при условии равномерного распределения их в кристаллической решетке, при этом значительное увеличение плотности дислокаций практически не сопровождается изгибом решетки и избыток дислокаций одного знака отсутствует, что свидетельствует о высокой степени релаксации в структуре.

Отмечены существенные особенности формирования структуры материалов при скоростной, а также с наложением УЗК термообработке. Так, с увеличением скорости нагрева наблюдается смещение температур начала и конца рекристаллизации в высокотемпературную область. Обосновывается экономическая целесообразность и техническая возможность совмещения процессов термообработки и волочения. Проанализированы способы и устройства ввода УЗК в очаг деформации при волочении, а также способы электроконтактного нагрева движущейся проволоки.

Наряду с волочением свинцово-оловянистых припоев с наложением УЗК назрела необходимость проведения исследований и разработки технологии волочения на станах со скольжением, что обеспечило бы высокую производительность процесса.

Вторая глава посвящена описанию характеристик материалов, технологий их получения, разработанного оборудования для волочения, термообработки, а также измерительных приборов и методик экспериментальных исследований.

В соответствии с целью и задачами работы в качестве исследуемых материалов использовали самофлюсующиеся свинцово-оловянистые припои по ГОСТ 21931-76 ПОС-61 с одним и пятью каналами, заполненными канифолью, нержавеющей сталью аустенитного класса 12X18H10T ГОСТ 18143-72, никель НП-2 ГОСТ 2179-75, сплавы хромель, алломель, копель, порошок окиси магния марки "ЧДА" ГОСТ 4526-75 и периклаз ПЭ-1, которые применяются при получении нагревостойкого кабеля КНМСН (ТУ 16-505.564 -75) и термодарного КТМС (ХА, ХК) (ТУ 16-505.757-75), а также проволоку из углеродистых сталей 10, 35 и 50, которая служила заготовкой для изготовления прецизионных изделий точного машиностроения.

Впервые в практике промышленного производства СНГ была реализована технология многократного волочения на станах со скольжением свинцово-оловянистых припоев. Сконструирован стан, содержащий 4 стальных волочильных барабана и 2 фильеродержателя на 16 переходов, обеспечивающий скорость волочения на последнем переходе 8 м/с. Станы волочения припоев диаметром с 5,0 мм на 1,0 мм содержат по шесть и четыре барабана с тремя и двумя фильеродержателями на 16 и 19 волок, соответственно и обеспечивают максимальную скорость волочения 8 м/с. Волочение припоев с 1,0 мм осуществляли на модернизированном стане модели ДНLC-0,2А. Для поддержания оптимальных температурных условий волочения разработано терморегулирующее устройство подогрева СОЖ, позволяющее поддерживать температуру с точностью $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Волочение и термообработку в лабораторных условиях проводили на разработанном ультразвуковом волочильном стане с генератором УЗГ 2-4М и магнитострикционным преобразователем ПМС 15А-18, обеспечивающим усилие волочения до 6,0 кН при скорости 1,5 м/с для исходной заготовки диамет-

ром до 6,0 мм. В конструкции стана предусмотрена возможность исследования различных схем ввода УЗК в очаг деформации. Для волочения тонких свинцово-оловянистых припоев использовали разработанный и применяемый в заводских условиях ультразвуковой стан с волноводами-волоками. Термообработку заготовки и готовых кабелей проводили в водородных электрических печах отжига. Для ЭКН на проход создана установка, позволяющая определять и поддерживать необходимую максимальную температуру проволоки при различных скоростях ее перемещения и диаметрах, совмещать термообработку и волочение в едином технологическом процессе. Предусмотрена возможность непрерывного ультразвукового воздействия на проволоку в процессе нагрева и охлаждения. Для термообработки тонкой проволоки в вакууме создана установка на базе вакуумного поста напыления УВН-2М с рабочим вакуумом $1 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст. Нагрев проволоки осуществляли источником стабилизированного постоянного тока (или переменным током посредством одновиткового трансформатора) до максимальной температуры 1500°C при скорости протягивания до 0,04 м/с.

Исследования характера распределения смещений торца волновода-волоки, пьезокерамических волок, изгибных колебаний в проволоке, а также установление механизма влияния УЗК на процесс прессования порошковых материалов проводили на созданной установке с привлечением методики голографической интерферометрии.

Для задания и измерения длины проволоки и скорости волочения, а также температуры разработаны соответствующие приборы СДЭ-1 и ИТ-1. В работе также использовали стандартные методики измерений физических величин и промышленное оборудование.

В третьей главе приведено описание разработанных способов ультразвукового воздействия при волочении, термообработке, а также получении кабельной заготовки и ее разделке с использованием УЗК, результаты исследований высокочастотных волноводных систем и условия протекания процесса прессования порошковых материалов в ультразвуковом поле.

С целью повышения эффективности ультразвукового воздействия при волочении с усилиями до 5 кН разработано устройство (рис. 1), стабильный режим работы в котором достигается за счет выполнения волновода в виде прямоугольного параллелепипеда с двумя гранями резонансных размеров, в центрах которых отсутствуют механические колебания и присоединение к ним опоры не влияет на режим работы акустической системы (А.с. № 1614878). На данном устройстве осуществляли волочение проволоки из стали 12Х18Н10Т с диаметра 3,0 мм с единичными обжатиями до 30 % и скоростью волочения до 30 м/мин. Снижение усилия волочения при наложении УЗК составило 35 ± 40 %, по сравнению с усилием волочения без УЗК.

На основе голографических исследований распределения механических

смещений созданы высокодобротные акустические системы для волочения мягких материалов: пьезокерамические волокни (А.с. № 831263), волноводы-волокни (А.с. № 1629129), установлены оптимальные режимы их работы, даны рекомендации по практическому использованию. Так, с помощью голографической интерферометрии в пьезокерамических дисках и волноводах определяли места с максимальным значением знакопеременных механических смещений, в которых затем выполняли волочильные каналы. Установлено, что для стабильной работы акустической системы необходимо на участках проволоки перед входом в волочильный канал и на выходе создавать стоячую волну. В этом случае нагрузка до 100 Н не влияет на распределение смещений в волноводной системе и сохраняется ее устойчивый резонансный режим работы.

Применение разъемной волоки, на которую накладывают УЗК в перпендикулярном волочению направлении, позволяет значительно снизить усилие волочения и увеличить степень обжатия за переход. Использование разъемных волок наиболее эффективно при обработке пластичных материалов. Для обработки сталей разработаны устройства с нагревом металла в очаге деформации (А.с. № 1103920, 1218543, 1161211), в частности, с помощью одновиткового трансформатора (А.с. № 1387260) (рис. 2). Для проведения процесса деформации проволоки в вакууме или защитной среде разработано устройство (рис. 3), в котором электрический ток к очагу деформации подводили с помощью одновиткового трансформатора, вторичной обмоткой которой служила металлическая конструкция, причем стенки вакуумной камеры являются ее частью (А.с. № 1448470). Первичная обмотка одновиткового трансформатора расположена на волноводе. Смотывающие и наматывающие катушки располагали либо внутри вакуумной камеры, либо за ее пределами. В последнем случае герметизация камеры осуществляется с помощью волок, установленных соосно с каналом разъемного волочильного инструмента. Обжатие в волоках задавали порядка 5 % при давлении в камере $10^2 \div 10^3$ мм.рт.ст.

Для электроконтактного отжига проволоки из среднеуглеродистых сталей разработан способ, который включает нагрев проволоки электрическим

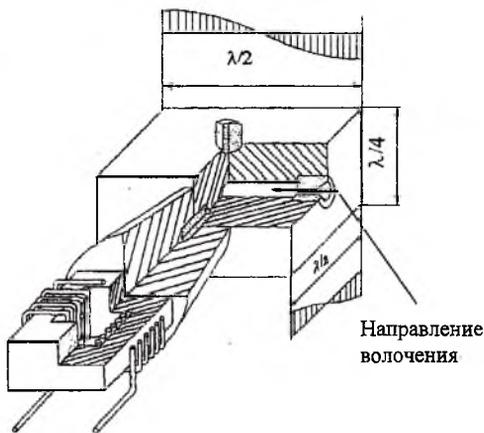


Рис.1 Устройство для волочения с наложением продольных ультразвуковых колебаний

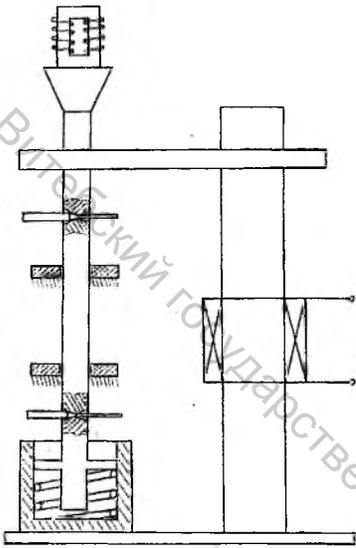


Рис. 2 Устройство для двухниточного волочения проволоки с одновитковым трансформатором

ется структура зернистого феррита в которой перлитная составляющая равномерно распределена по сечению, чем обусловлено повышение её пластических свойств.

Особенностью процесса волочения кабеля с минеральной изоляцией является то, что при волочении происходит одновременно деформация оболочки, жилы и изоляционного слоя, с увеличением плотности последнего. При этом деформирование жил происходит под действием сил, передаваемых через слой порошкового наполнителя. В результате на поверхности жил образуются вмятины (шероховатости), возникают значительные отклонения формы поперечного сечения жил от круга и неоднородность площади их сечения по длине. Причем неоднородности сечения жил (площадь и форма) зависят от физико-механических свойств как материала жил, так и порошкового наполнителя и в особенности от его гранулометрического состава. Это приводит при последующем волочении, особенно кабеля малого диаметра, к обрывам жил, а также к нестабильности термо ЭДС, выходу из строя нагревостойкого кабеля при эксплуатации.

током промышленной частоты до температуры аустенизации с одновременным возбуждением в проволоке ультразвуковых колебаний на участке между волокой, закрепленной в концентраторе, и отражателем. Одним из контактов служила твердосплавная волока, вторым - отражатель, выполненный в виде роликов, изготовленных из стали ШХ15. Такой способ позволяет воздействовать на движущуюся проволоку ультразвуковыми колебаниями только на участке нагрева, поскольку за отражателями интенсивность УЗК мала.

Предложен способ термической обработки проволоки перед волочением (А.с. № 1453905), включающий ускоренный нагрев до температуры $700...780^{\circ}\text{C}$ с одновременным наложением на нее УЗК и последующее охлаждение с УЗК. Использование способа позволило проводить одновременно с термообработкой и волочение стальной проволоки. В результате ультразвукового воздействия как в процессе нагрева, так и регламентированного охлаждения до температуры $550...600^{\circ}\text{C}$ в проволоке формируется

Переход к порошкам, имеющим меньшие размеры частиц, например, к окиси магния марки “ЧДА” по ГОСТ 4526-75, получаемой химическим способом, в значительной степени устраняет указанные недостатки. Однако мелкодисперсная окись магния обладает малой текучестью (сыпучестью), что не позволяет использовать при изготовлении заготовки известный метод засыпки с одновременным волочением, где перемещение порошка происходит под действием сил тяжести.

Разработанная технология и оборудование с применением ультразвуковых колебаний позволили производить заполнение кабельной заготовки порошком любого granulометрического состава (А.с. № 288911, 311537)(рис. 4). Для этого помимо капиллярных трубок, служащих направляющими для жил, в конструкцию оборудования дополнительно вводились засыпочные трубки, в которых возбуждали изгибные ультразвуковые колебания. Это позволило увеличить скорость засыпки порошка, полностью исключить пустоты в кабельной заготовке и обеспечить засыпку мелкодисперсного порошка. Локализация ультразвуковых колебаний в засыпочных трубках исключает возбуждение колебаний в жилах, что позволило поддерживать точную их центровку в кабельной заготовке в процессе засыпки порошка. Скорость протягивания заготовки при этом увеличилась до 0,04 м/с, т.е. в 2 раза по сравнению с заводской технологией.

В заводских условиях разработанную технологию использовали при заполнении трубы из стали ЭИ-435 (ТУ-14-3-582-77) длиной 3 м, внутренним диаметром 16 мм и толщиной стенки 2 мм с внутренними жилами из сплавов алюминий, хромель (ТУ-48-21-41-72) диаметром 3,6 мм для получения терморпарной кабельной заготовки КТМС (ХА, ХК) и с внутренними жилами из никрома (ГОСТ 12766-1-77) диаметром 3,3 мм для получения заготовки нагревостойкого кабеля КНМСН. В качестве изоляционного порошка использовали окись магния марки “ЧДА” (ГОСТ 4526-75) со средним размером частиц 2...4 мкм. Степень деформации при волочении заготовки составляла 15 %. Из исходной заготовки кабеля диаметром 22 мм получали изделия конечного диаметра 0,15 мм. В случае использования окиси магния марки ПЭ-1М с размером частиц 40...60 мкм получить изделие диаметром менее $1,5 \pm 1,0$ мм не удавалось.

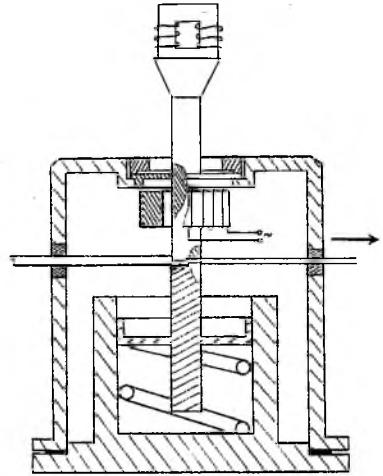


Рис. 3 Устройство для волочения через волоку с электроконтактным нагревом в вакууме

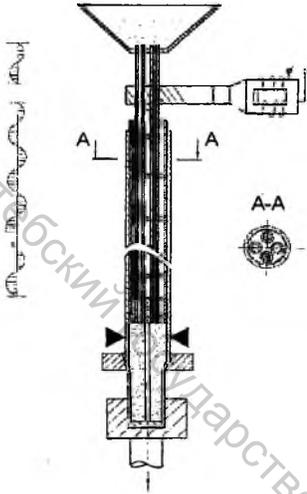


Рис. 4 Схема засыпки изоляционного порошка с возбуждением УЗК в засыпочных трубках

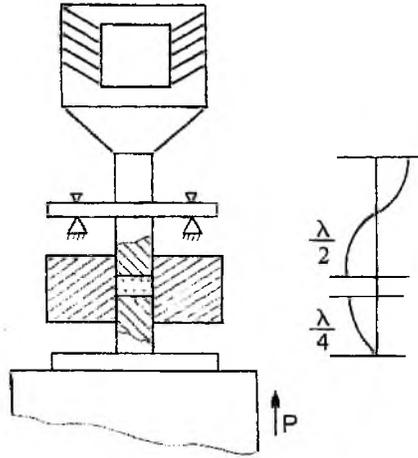


Рис. 5 Схема ультразвукового прессования порошка

Разработан процесс прессования с наложением УЗК порошков пьезокерамических материалов BaTiO_3 (Пат. РФ № 2007272) (рис. 5), которые использовали при изготовлении волоочильного инструмента. Методом голографической интерферометрии установлено, что на начальном этапе прессования без УЗК уплотнение происходит в ограниченной области у верхнего пуансона, затем охватывает среднюю и нижнюю часть прессовки. При прессовании с ультразвуком прессуемый порошок проходит такие же стадии уплотнения, как и без ультразвука, и при определенной плотности брикет начинает колебаться как монолитное тело. Однако, при прессовании в ультразвуковом поле порошок раньше достигает состояния, когда частицы начинают двигаться упорядоченно, снижаются силы контактного трения между порошком и стенками матрицы, что обеспечивает заданную плотность при меньших статических нагрузках. Таким образом, установлено, что УЗК повышают плотность образцов, способствуют снижению пористости и более равномерному распределению пор по объему (рис. 6). Как результат этого на $10+15\%$ увеличивается диэлектрическая проницаемость готовой пьезокерамики.

Разработана и реализована технология разделки кабеля с минеральной изоляцией при изготовлении первичных термопреобразователей с помощью энергии УЗК. За счет возбуждения на фиксированном участке кабеля изгибных УЗК удалось произвести удаление как изоляционного порошка, так и металлической оболочки кабеля диаметром до 200 мкм без повреждения внутренних жил.

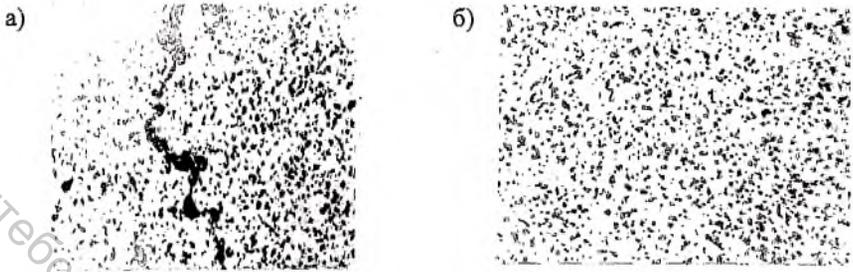


Рис. 6 Микроструктура BaTiO_3 после спекания:
а) прессование без УЗК; б) прессование с УЗК ($\times 12$)

В четвертой главе приводятся результаты исследований процесса термообработки и волочения проволоки из сплавов НП-2, Д16, сталей 10, 35, 50 с электроконтактным нагревом и наложением УЗК, а также результаты исследований механических и структурных изменений в них, расчет максимальной температуры нагрева движущейся проволоки и кабеля.

При волочении через разъемные волокна без нагрева металла в очаге деформации с ростом скорости волочения наблюдается резкое увеличение усилия деформирования (рис. 7). Максимальная скорость волочения в этом случае составила 0,23 м/с. Электроконтактный нагрев позволил достичь скорости деформирования заготовки до 0,55 м/с. Максимальное снижение усилия волочения наблюдается для стали 10 при плотностях тока 400 А/мм^2 , для сплава Д16 – 160 А/мм^2 .

Для образцов никеля, деформированных без электроконтактного нагрева, с ростом степени деформации наблюдается увеличение предела прочности (σ_b). При плотностях тока, протекающего через зону деформации, более 200 А/мм^2 заметного упрочнения образцов никеля при малых скоростях волочения не наблюдали. При токе плотностью более 350 А/мм^2 происходит снижение предела прочности проволоки из НП-2 на 18+20 %, по сравнению с волочением без ЭКН. Пропускание тока через зону деформации позволило увеличить единичные обжатия в 1,5...2 раза по сравнению с деформацией только с наложением УЗК. При этом предел прочности металлов снижается в зависимости от плотности тока до 20 %. Коэффициентная сила и остаточная магнитная индукция частично размагниченного состояния материала изменяются в 2...3 раза в зависимости от плотности электрического тока и их можно рекомендовать для выбора и контроля оптимальных режимов термомеханической обработки проволоки.

Скорость нагрева при термической обработке проволоки на проход является важным технологическим фактором, оказывающих сильное влияние на скорость процесса рекристаллизации, величину зерен, а, следовательно, и на физико-механические свойства металла. Скоростной нагрев сокращает время нахождения металла в области фазовых и структурных превращений, что по-

зволяет получать новые сочетания структур с различными физико-механическими свойствами.

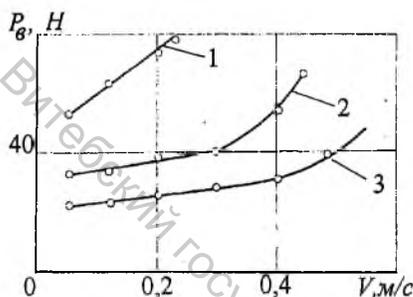


Рис. 7 Зависимость усилия протягивания проволоки из сплава Д16 от скорости волочения для различных температур нагрева: 1 - без нагрева; 2 - 300°C; 3 - 400°C; $\varepsilon = 25\%$; $A = 15$ мкм

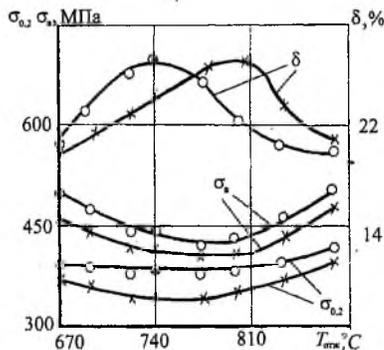


Рис. 8 Зависимость механических свойств проволоки из стали 35 от температуры отжига (скорость нагрева 35 град/с); \times - отжиг без УЗК; \circ - с УЗК.

Установлены закономерности изменения механических свойств проволоки от температуры отжига при ультразвуковом воздействии. Так, предел прочности стали 35 с ростом температуры отжига до 750°C несколько снижается (рис. 8), а затем возрастает и имеет большее значение, чем у образцов после скоростного отжига без воздействия ультразвука. Предел текучести после ультразвукового отжига с ростом температуры до 860°C изменяется незначительно. Для отожженной в обычных условиях проволоки наблюдается снижение предела текучести в интервале температур 700...770°C, а затем его увеличение. Относительное удлинение проволоки после ультразвуковой обработки при температурах отжига до 750°C имеет более высокие значения, чем после обычного отжига. При нагреве до 770°C со скоростью 250 град/с предел прочности практически не изменялся при отжиге в обычных условиях, а после термоультразвуковой обработки значение его несколько меньше. При дальнейшем повышении температуры отжига наблюдается увеличение σ_b , что обусловлено упрочнением материала за счет ультразвуковой обработки. Предел текучести ($\sigma_{0.2}$) стали имеет минимум в интервале температур 750...800°C, причем величина $\sigma_{0.2}$ после отжига с наложением УЗК имеет более высокие значения. Характер изменения микротвер-

дости от температуры отжига аналогичен изменениям σ_b . Зависимость остаточной индукции Br от амплитуды переменного размагничивающего поля (рис. 9) показывает, что наиболее интенсивное снижение остаточной индукции происходит для образцов проволоки из стали 35 после отжига с наложением УЗК.

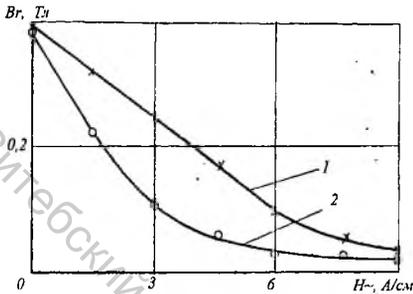


Рис. 9 Кривые размагничивания образцов стали 35 после отжига при 710°C (35 град/с); 1 - отжиг без УЗК; 2 - с УЗК

В этом случае большая часть объема металла размагничивается в полях до 5... 6 А/см. Но жесткие участки металла можно размагнитить воздействуя более высокими переменными магнитными полями. Так, в поле 9 А/см образцы стали после термоультразвукового отжига размагничиваются полностью, в то же время образцы после обычного скоростного отжига в этом поле полностью не размагничиваются. После отжига при температуре 770°C различия между кривыми размагничивания образцов проволоки менее значительны. Даже при $H_{\text{к}} = 9$ А/см часть объема термооб-

работанного металла полностью не размагничивается, что свидетельствует о присутствии в структуре участков с высокими критическими полями. Такое изменение физико-механических свойств характерно в целом и для сталей 10 и 50. Поскольку остаточная индукция после частичного размагничивания переменным полем достаточно чувствительна к структурным изменениям, происходящим при скоростной термообработке, то измерениями её величины осуществляли экспресс контроль механических свойств проволоки.

После термической обработки с УЗК проволоку из стали 35, 10, 50 подвергали волочению на ультразвуковом однократном стане без дополнительной подготовки поверхности и нанесения подмазочного слоя. Смазкой служила водно-мыльно-масляная эмульсия, полученная за счет ультразвукового диспергирования. В качестве инструмента использовали твердосплавные и алмазные волокна типа "СКМ". Установлено, что после волочения с УЗК в проволоке наблюдается более равномерное распределение структурных составляющих стали - перлита и феррита и по своим качествам она пригодна для изготовления прецизионных изделий точного машиностроения.

Осуществление электроконтактного нагрева требует поддержания с высокой точностью необходимой плотности тока при заданной скорости протягивания проволоки, максимальной температуре нагрева, длине базы отжига. С уменьшением диаметра проволоки и увеличением скорости протягивания требования по стабильности тока нагрева ужесточаются.

Расчет максимальной температуры нагрева заготовки в зависимости от величины электрического тока I проведен с учетом тепловых потерь излучением. Так как движение заготовки осуществляли с постоянной скоростью, то на участке отжига устанавливается стационарное распределение температур по

длине не зависящее от времени. Для определения максимальной температуры нагрева проволоки получено выражение:

$$t_{\max} = \frac{4I^2 \rho_0}{q\pi^2 D^3 - 4I^2 \rho_0 \alpha} + \left(t_0 - \frac{4I^2 \rho_0}{q\pi^2 D^3 - 4I^2 \rho_0 \alpha} \right) \cdot \exp \left[-\frac{4l(q\pi D^3 - 4I^2 \rho_0 \alpha)}{\gamma \pi^2 D^4 V \bar{c}} \right], \quad (1)$$

где γ - плотность материала проволоки, \bar{c} - среднее значение удельной теплоемкости, q - удельные тепловые потери излучением, D - диаметр проволоки, V - скорость движения проволоки, ρ_0 - удельное электросопротивление проволоки при комнатной температуре T_0 , α - температурный коэффициент сопротивления, l - расстояние между электрическими контактами (база отжига). Уравнение (1) позволяет определить максимальную температуру проволоки на участке нагрева в зависимости от величины электрического тока, скорости протягивания, диаметра отжигаемой проволоки и расстояния между контактами. Кроме того, в расчетную формулу входят физические характеристики материала проволоки γ , ρ_0 , α , \bar{c} . Потери за счет теплового излучения учтены в линейном приближении.

При электроконтактном отжиге кабеля нагрев металлической оболочки происходит непосредственно за счет пропускания электрического тока. Нагревание токопроводящей жилы и изолирующего порошка (окиси магния) происходит за счет процесса теплообмена с оболочкой кабеля. Для случая одной токопроводящей жилы максимальная температура нагрева может быть определена из выражения

$$t_{\max} = \frac{I^2 \rho_0}{q\pi^2 D^2 h - I^2 \rho_0 \alpha} + \left(t_0 - \frac{I^2 \rho_0}{q\pi^2 D^2 h - I^2 \rho_0 \alpha} \right) \times \exp \left[-\frac{4(q\pi^2 D^2 h - I^2 \rho_0 \alpha)}{\pi^2 DhV (4\gamma_{об} \bar{c}_{об} Dh + \gamma_{жс} \bar{c}_{жс} d_{жс}^2 + \gamma_n \bar{c}_n S_n)} \right], \quad (2)$$

где D - диаметр кабеля, S - площадь поперечного сечения, $\gamma_{об}$, $\gamma_{жс}$, γ_n - плотности, $\bar{c}_{об}$, $\bar{c}_{жс}$, \bar{c}_n - средние значения удельных теплоемкостей соответственно оболочки, жилы и порошка, h - толщина оболочки.

В пятой главе приведены результаты исследований по волочению и термообработке как металлов входящих в состав кабеля, так и в целом кабеля с минеральной изоляцией.

Установлено, что наложение УЗК при скоростях волочения до 0,1 м/с приводит к снижению усилия волочения для проволоки из нержавеющей стали и никеля на 70...80 %. С увеличением скорости до 0,3 м/с усилие волочения возрастает в 1,5...2 раза. После волочения кабеля с наложением УЗК текстура

оболочки менее выражена, наблюдается несколько меньшее количество мартенсита, что в основном связано с тепловым действием УЗК. Локальный нагрев в очаге деформации приводит к торможению $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. Анализ результатов рентгеноструктурных и микроструктурных исследований показывает, что использование УЗК при волочении нагревостойкого и термопарного кабеля позволяет уменьшить фазовый наклеп оболочки и жилы из стали 12X18H10T за счет торможения $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, формирует более мелкозернистую структуру и тем самым создает предпосылки для увеличения единичных обжатий при последующем волочении. Об этом свидетельствуют и результаты исследования прочностных свойств проволоки из стали 12X18H10T после волочения в обычных условиях и с наложением УЗК.

Установлено, что оптимальными режимами отжига проволоки 12X18H10T с помощью электроконтактного нагрева для малых обжатий являются температуры 1100...1150°C, а для обжатий 12...30 % - температурный интервал составляет 1000...1100°C. Для проволоки НП-2 скоростной отжиг рекомендуется проводить после малых обжатий при 1050...1100°C, а при $\epsilon=15...25\%$ температура отжига должна составлять 900...1000°C. При проведении скоростного отжига с наложением УЗК температуры отжига могут быть снижены на 50...100°C, по сравнению с отжигом без УЗК.

При сравнительно невысоких скоростях нагрева кабеля (100...250 град/с) различие в температурах оболочки и жилы невелико и не превышает 20...40°C. С ростом скорости нагрева различие достигает 50 ...70°C. Так как температура отжига никелевой проволоки, а также термопарной, в среднем на 100...150°C ниже температуры отжига стали 12X18H10T, то для термообработки кабеля рекомендованы скорости нагрева до 400 град/с.

На основании проведенных исследований рекомендован способ волочения нагревостойкого кабеля, совмещенный с термообработкой в единый технологический цикл. Движущуюся кабельную заготовку с помощью ЭКН нагревали до температур полной аустенизации (1000-1100°C), затем охлаждали водой до температуры 150...200°C и осуществляли волочение с обжатием 25...30 %. В качестве технологической смазки использовали машинное масло с добавлением дисульфида молибдена.

Установлено, что при нагревании кабеля до температуры 1000-1100°C в структуре оболочки образуется аустенитная фаза, которая фиксируется последующей закалкой. Упрочнение нержавеющей стали 12X18H10T при волочении определяется двумя процессами: упрочнением аустенита и превращением его в мартенсит деформации. Образование значительного количества мартенсита в тонкостенной оболочке кабеля приводит к ее растрескиванию, задирам, что не позволяет получить качественное изделие. Увеличение температуры деформации до 150-200°C, а также наложение УЗК приводит к торможению $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и снижает деформационное упрочнение стали, что позволило

уменьшить образование α -фазы в структуре стали, снизить сопротивление деформации и увеличить единичные обжатия.

С целью улучшения эксплуатационных характеристик кабеля разработана технология изготовления кабельной заготовки, в которой предусмотрена предварительная термообработка токопроводящей жилы для создания регламентированной структуры. Для этого токопроводящую жилу перед помещением в трубу-заготовку подвергали деформации волочением с суммарным обжатием 50-70 % и наложением УЗК, а затем нагревали до температуры на 100-150°C выше температуры следующих после волочения отжигов кабеля и ускоренно охлаждали водой. В результате в материале жил формировалась мелкозернистая структура, что обеспечивало их высокую пластичность. Это позволило повысить единичные обжатия при последующем волочении, а также улучшить качество готового изделия за счет снижения неравномерности сечения жил по длине и тем самым повысить эксплуатационные характеристики изделия (А.с. № 311188).

Разработанную технологию применяли для предварительной обработки жил нагревостойких кабелей, в которых, в качестве токопроводящих жил используют проволоку из сталей 12X18H10T, 12X18H9T, сплавов X20H80H, XH78T, никеля НП-2.

В шестой главе изложены результаты исследований процесса волочения оловянно-свинцовых припоев. Приведена методика выбора рационального маршрута волочения на станах со скольжением и наложением УЗК, а также расчет усилия волочения.

Оболочка оловянно-свинцового припоя в процессе волочения находится в сложном взаимодействии с порошкообразным сердечником. Частицы сердечника при обжатии его оболочкой подвержены консолидации, т.е. сложному перемещению и упруго-пластическому взаимодействию друг с другом под действием внешней нагрузки. При деформации трубки, заполненной канифолью, после первого перехода происходит разрушение монолитного сердечника, и образование порошкообразной смеси. Экспериментально установлено, что весовое соотношение между оболочкой и канифольным наполнителем при многократном волочении не изменяется после достижения суммарной деформации 35+40 %.

На основании совместного решения уравнения равновесия элемента трубки в очаге деформации и условия пластичности рассчитаны усилия волочения свинцово-оловянистого припоя с наполнителем. При расчетах канифоль рассматривали как вязкопластичное тело, или тело Бингама, для которого применима модель ньютоновской жидкости. Отличие расчетных значений усилий от экспериментально полученных составляет 5+10 %, что позволяет рекомендовать разработанную методику расчета к практическому использованию.

Проведенные исследования по выбору материала волочильного инструмента и вида смазки показали, что наименьшее усилие волочения обеспечива-

ют алмазные волокна, при этом величина угла рабочего конуса волокна, обеспечивающая наименьшую обрывность, составляет $2\alpha = 37\div 40^\circ$ (А.с. № 1810151). В качестве смазки для процесса волочения припоя диаметром менее 1,0 мм рекомендован сухой мыльный порошок, обеспечивающий наибольшее снижение усилия волочения при больших единичных обжатиях, а для превышающих 1,0 мм – жидкие смазки: “Эфирин”, “Эмульсионная”, КВЖ-2 и КВЖ-3, мыльная эмульсия.

Для улучшения качества заготовки припоя на выходе из пресса предложено подвергать ее волочению через роликовую волоку с единичным обжатием в пределах $5\div 20\%$. Это позволило совместить процесс волочения заготовки из под пресса через роликовую волоку с волочением на многократном стане со скольжением и обеспечивало тем самым высокую производительность при хорошем качестве получаемой продукции (А.с. № 1810148).

Экспериментально установлено, что при волочении проволоки из сплава олово-свинец величина максимальных единичных обжатий зависит от диаметра проволоки. Это связано с тем, что с уменьшением диаметра проволоки увеличивается удельная доля энергии, идущая на преодоление сил трения. А так как оловянно-свинцовый припой не упрочняется, то удельная энергия, идущая на пластическое формоизменение, остается практически постоянной для различных диаметров. Показано, что процесс волочения свинцово-оловянистой проволоки и одноканальной трубки с наполнителем из канифоли диаметром, равным или большим 5,0 мм, протекает стабильно при коэффициенте запаса прочности $\gamma \geq 2,5$, для диаметров от 5,0 мм до 1,0 мм – при $\gamma \geq 2,6$, для диаметров от 1,0 мм до 0,4 мм – при $\gamma \geq 2,7$, для диаметров от 0,4 мм и меньше – при $\gamma \geq 2,8$. На основании этого предложено деформацию осуществлять с разными обжатиями по маршруту, что позволило сократить парк волочильного инструмента, время на заправку стана и повысить стабильность процесса волочения за счет перераспределения суммарной работы деформации проволоки по переходам. Предложена методика определения переменных единичных обжатий по переходам, определяющая и конструктивные параметры волочильного стана (А.с. № 1810147).

Разработана методика оптимизации маршрута волочения с наложением ультразвуковых колебаний, обеспечивающая при заданных условиях процесса и параметрах УЗК максимальную производительность. Так, при волочении пятиканального оловянно-свинцового припоя с одно- и трехпроцентным наполнением канифолью через алмазные волокна, закрепленные в концентраторе, оптимальные значения единичных обжатий составили 30 % и 34 %, а при волочении через волноводы специальной конструкции – 28 % и 29 %.

Теоретически рассмотрен процесс волочения пластичных материалов через разъемную волоку для случая, когда частота соударений половинок волокна равна частоте ультразвуковых колебаний. Воздействие концентратора, на торце которого расположена пучность смещений, рассмотрено как удар трех тел:

концентратора с приведенной массой m_1 ; верхней полуволокны вместе с обрабатываемым материалом, суммарная масса которых m_2 ; нижней полуволокны массой $M \gg m_1 + m_2$. Получено выражение для определения напряжения волоочения $\sigma_{\text{вол}}$ в зависимости от амплитуды УЗК:

$$\frac{\sigma_{\text{вол}}}{\sigma_T} = \frac{\left(\frac{\varphi}{2\mu} + 1\right) \cdot \left[\left[\left(\frac{d}{d_k}\right)^a - 1 \right] + \left[\left(\frac{d_k}{d_1}\right)^a - 1 \right] \right]}{\left[\left(\frac{d_k}{d_1}\right)^a - \left(\frac{d_1}{d_k}\right)^a \right]} \cdot \frac{\omega m_1^2}{m_1^2 + (m_1 + m_2)^2} \left[\omega A m_1 - \frac{m_2}{2} \sqrt{\frac{\varphi \omega A V}{2\pi}} \right] \cdot \frac{\sigma_T d_k^2}{\varphi + 2\mu} \left[\left(\frac{d_k}{d_1}\right)^a - \left(\frac{d_1}{d_k}\right)^a \right], \quad (3)$$

где φ — угол входного конуса волокны; σ_T — среднее значение предела текучести металла; μ — коэффициент трения; ω — циклическая частота УЗК; d, d_1, d_k — диаметры входного, выходного и критического сечений; $a = \frac{4\mu}{\varphi}$; V — скорость волоочения.

Отличие теоретических и экспериментальных результатов не превышает 15%.

Методами тепловизионной термографии и компьютерного моделирования тепловых режимов исследованы различные виды волноводов, используемые для волоочения. Показано, что наиболее эффективными являются волноводы с выполненными в них волоочильными каналами (волноводы-волокны) и волноводы с запрессованными волоками.

Разработан способ непрерывного неразрушающего контроля заполнения трубчатого припоя канифолью в процессе его изготовления. Способ основан на предварительном определении зависимости усилия волоочения припоя от количества содержащейся в нем канифоли и последующем регулировании количества канифоли в заготовке из-под пресса при изменении усилия волоочения. Способ прост в реализации, позволяет получить припой с равномерным распределением канифоли по длине трубки, исключить брак, обусловленный отсутствием канифоли в каналах трубчатой заготовки (А.с. № 1563938).

В седьмой главе представлены и проанализированы результаты исследований влияния ультразвуковых колебаний на эффекты мартенситной неупругости в сплавах с памятью формы (СПФ).

Результаты исследований по инициированию эффекта памяти формы в Ti-50,4ат.%Ni после деформации изгибом показали, что в образцах, испытывавших неупругую деформацию, возбуждение ультразвуковых колебаний вызывает формовосстановление (Пат. РБ 2413). Величина максимальной полностью обратимой деформации при ультразвуковом инициировании для TiNi с температурами начала и окончания обратного превращения 48 и 60°C соответственно в процессе ультразвукового воздействия амплитудой 10 мкм и частотой 22 кГц составляет до 3 %. Кинетика процесса ультразвукового инициирования

памяти формы свидетельствует, что воздействие ультразвуковых колебаний при прямом и обратном мартенситных превращениях вызывает возврат накопленной деформации. Поскольку процесс сопровождается ультразвуковым нагревом, то на этапе прямого превращения наблюдаются малые петли термомеханического гистерезиса (рис. 10), что особенно ценно при использовании СПФ в качестве исполнительных устройств. Возврат деформации на этапе нагрева связан с диссипацией энергии ультразвуковых колебаний и, как следствие, образованием устойчивого аустенита. Для объяснения механизмов иницирования эффектов памяти формы в ультразвуковом поле предложена модель, учитывающая воздействие на материал тепловой и силовой составляющих ультразвука, согласно которой тепловая составляющая действует эквивалентно механизму термического иницирования, а силовая составляющая вызывает в материале знакопеременные механические напряжения, изменяющие условия фазового равновесия в материале, понижая силу сопротивления движению фазовой границы.

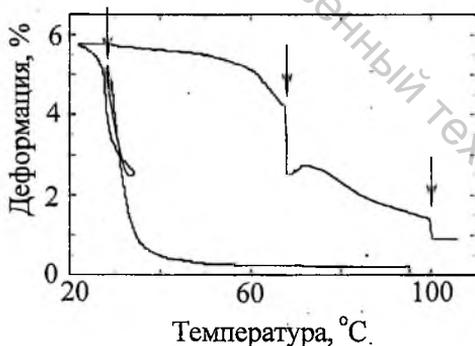


Рис. 10 Температурные зависимости деформации при охлаждении и нагреве образца (под нагрузкой 30 МПа) состава Ti-50,4 ат.% Ni. Стрелками обозначены моменты включения (\downarrow) УЗК

лизируется, что обусловлено более низким уровнем внутреннего трения характерного для никелида титана в аустенитном состоянии по сравнению с мартенситным и двухфазным.

Изменение резонансной частоты в зависимости от времени действия УЗК и температуры на поверхности образца указывает на то, что фазовое превращение в материале под действием ультразвука начинается и заканчивается при более низкой температуре. Интервал уменьшения температуры окончания обратного фазового превращения в зависимости от условий ультразвукового

Методом инфракрасной термографии поверхности TiNi образцов установлено, что в образцах резонансной длины в процессе воздействия ультразвука максимальный нагрев наблюдается в узлах смещений и минимальный в пучностях смещений механических колебаний, перепад температуры по длине образца в процессе его нагрева за счет поглощения энергии УЗК до температуры окончания обратного фазового превращения (A_c) сохраняется и составляет более 20°C. В аустенитном состоянии УЗК не вызывают дальнейшего нагрева образца и его температура стабилизируется, что обусловлено более низким уровнем внутреннего трения характерного для никелида титана в аустенитном состоянии по сравнению с мартенситным и двухфазным.

иницирования составляет до 25°C . Это объясняется тем, что знакопеременные напряжения ускоряют движение межфазных границ, ответственных за реализацию эффекта памяти формы (ЭПФ).

Термографические исследования по ультразвуковому восстановлению формы после S-образной деформации образца в мартенситном состоянии показали, что ультразвуковой нагрев образцов TiNi и монокристалла сплава CuAlNi приводит к последовательной реализации эффекта памяти формы по длине образца («скользящий» ЭПФ). Это вызвано как локализацией механических напряжений ультразвуковых колебаний, так и за счет разделения образца зоной фазового превращения на две области: низко- и высокотемпературную. Такой режим развития деформационных процессов принципиально отличается от характера ЭПФ при нагреве материала электрическим током или равномерно с поверхности и расширяет возможности управления конструкциями, работающими на эффекте памяти формы.

Дилатометрические исследования образцов TiNi показали, что предварительная ультразвуковая обработка изменяет важнейшие функциональные свойства СПФ – величину обратимой деформации и характеристические температуры мартенситных превращений. Наибольшее влияние УЗК оказывают на температуру окончания обратного фазового перехода. Изменение этой температуры составляло более 20 градусов в сторону увеличения для образцов, озвученных вблизи температуры A_k .

Впервые установлено, что в деформационном поведении сплавов TiNi при ультразвуковом воздействии в интервале температур обратного фазового превращения ($A_n \div A_k$) имеется аномалия поведения напряжения течения, выражающаяся в том, что в моменты ультразвукового воздействия небольшое падение напряжения сменяется его возрастанием. С увеличением амплитуды ультразвука механические напряжения растут вплоть до предела прочности. Это связано с повышением температуры при воздействии УЗК и увеличением количества аустенитной фазы, что при постоянной величине полной деформации инициирует генерацию механических напряжений.

В соответствии с предложенной моделью на начальном этапе ультразвукового воздействия доминирует силовая составляющая ультразвука, которая вызывает уменьшение напряжения течения. В мартенситном и аустенитном состоянии сплав демонстрирует «нормальное» акустическое разупрочнение, подобное тому, которое проявляется в большинстве металлов, не претерпевающих фазового превращения (эффект Блага-Лангенекера).

Диссипация энергии ультразвуковых колебаний в материале происходит, во-первых, за счет перемещения дефектов (дислокаций, межфазных и междвойниковых границ) и, во-вторых, за счет возрастания энергии тепловых колебаний атомов. Роль второго фактора обычно считают незначительной, поскольку малые изменения температуры в металлах слабо влияют на предел текучести. Однако в сплавах с мартенситными превращениями температурный фактор может оказаться решающим.

Экспериментально и с помощью физического моделирования установлено, что влияние УЗК на материалы с памятью формы вблизи интервала температур превращения определяется его тепловым действием: возрастание температуры приводит к разупрочнению или упрочнению в зависимости от исходного фазового состояния материала.

Обнаружено, что проявление эффекта ультразвукового инициирования памяти формы в стесненных условиях приводит к возникновению в материале реактивных механических напряжений, релаксирующих после прекращения воздействия ультразвука (рис. 11). Максимальное значение развиваемых напряжений в образцах TiNi составляет 100–150 МПа. Эти данные согласуются с предложенной моделью и связаны с уменьшением температуры мартенситного превращения и увеличением количества аустенитной фазы. На основе обнаруженного явления ультразвуковой генерации реактивных механических напряжений предложен способ управления силовыми исполнительными устройствами в изотермических условиях за счет воздействия ультразвуковых колебаний (Пат. РБ № 4065).

Наложение ультразвуковых колебаний на волочильный инструмент ведёт к снижению усилия волочения TiNi проволоки на 25–30% по сравнению с волочением в обычных условиях, что обусловлено в основном снижением сил контактного трения в очаге деформации. Значения степени восстановления формы практически совпадают для случая волочения с наложением ультразвука и в обычных условиях (рис. 12). Термообработка проволоки после деформации менее 7% ведёт к полному возврату исходной формы, а после деформации свыше 17% эффект памяти формы в значительной мере подавляется.

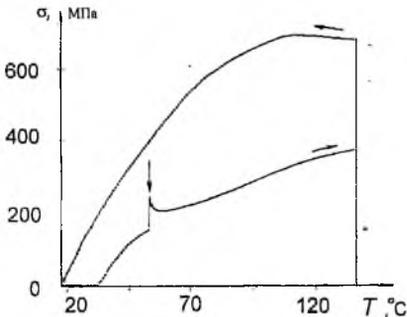


Рис. 11 Зависимость генерируемого напряжения от температуры сплава TiNi. Стрелка (\downarrow) указывает момент импульсного включения УЗК

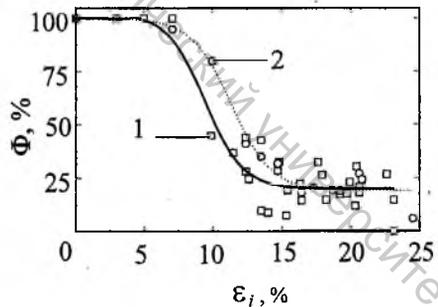


Рис. 12 Зависимость степени восстановления формы TiNi проволоки от величины единичных обжатий после волочения: 1 - без УЗК; 2 - с УЗК

Прочностные свойства проволоки, протянутой с наложением УЗК и без ультразвука, одинаковые. Наложение ультразвуковых колебаний на различных этапах задания предварительной деформации образца вызывает рост величины обратимой памяти формы по сравнению с деформацией без ультразвукового воздействия. Наибольшее влияние на величину обратимой памяти формы вызывает ультразвуковое воздействие в температурном интервале прямого фазового превращения при нагреве, которое вызывает инициирование эффекта памяти формы.

На основании результатов проведенных исследований разработаны способы задания обратимой памяти формы в TiNi с помощью ультразвуковых колебаний (Пат. РБ № 4133, 4134). Наложение УЗК на образец в процессе деформации вызывает рост величины ОПФ до 50 % по сравнению с обработкой без ультразвукового воздействия. Кроме того, в процессе реализации ОПФ ультразвуковые колебания позволяют формировать малые петли в неполном интервале мартенситных превращений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов диссертационной работы можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Развита представления о совместном пластическом деформировании разнородных материалов. Проведено моделирование процессов формообразования изделий с порошковым наполнителем в металлической оболочке при различных схемах волочения. Установлено, что благоприятные условия формообразования достижимы при наложении ультразвуковых колебаний и использовании скоростного электроконтактного нагрева. Снижение при этом усилий и напряжений волочения позволило стабилизировать процесс формообразования изделий, увеличить степень обжатия за проход, повысить плотность и равномерность распределения порошкового наполнителя в металлической оболочке [1–3, 10, 15, 17, 18, 20, 22, 24, 32, 33, 35, 39, 41].

2. Разработаны и реализованы в промышленных условиях, а также в практике научных исследований новые схемы ввода ультразвуковых колебаний в очаг деформации при волочении:

- предложена волноводная система, выполненная в виде параллелепипеда с двумя гранями резонансных размеров, отсутствие колебаний центров которых обеспечивает стабильный резонансный режим работы при усилиях волочения до 5кН, реализована схема волочения кабелей в металлической оболочке, исключаящая возникновение в них изгибных колебаний и обрыв внутренних жил;

- предложено устройство для двухниточного волочения через разъемные волокнистые электроконтактные нагреватели металла в очаге деформации с помощью однониточного трансформатора, что позволило увеличить стойкость волочильного инструмента в 2-3 раза, уменьшить энергозатраты и увеличить скорость волочения;

- создана вакуумная ультразвуковая установка с рабочим давлением в камере $10^{-2} \div 10^{-3}$ мм.рт.ст., вакуумная камера которой служит частью вторичной обмотки однониточного трансформатора;

- разработана конструкция волокна, состоящая из двух частей резонансных размеров, разделенных пьезокерамической прокладкой с возбуждением в ней ультразвуковых колебаний, нагрев металла в очаге деформации осуществлен за счет пропускания электрического тока через половинки волокна [1, 101, 105-107, 111-113, 117, 119, 121].

3. Установлено, что электроконтактный нагрев расширяет технологические возможности способа волочения через разъемный инструмент. Максимальные единичные обжатия для никеля НП-2, сплава Д16 и стали 10 возросли в 1,5...2 раза, а скорость волочения - в 1,5 раза. Упрочнение металла в зоне деформации снижается в зависимости от плотности тока на 15 - 20 %. Показано, что коэрцитивная сила и остаточная магнитная индукция частично размагниченного состояния высокочувствительны к структурным изменениям, происходящим при волочении никеля и стали 10, что позволяет контролировать и управлять процессом нагрева проволоки при волочении и термообработке проволоки [1, 4, 12, 18, 24, 37, 40, 58].

4. Исследован процесс волочения проволоки из стали 12Х18Н10Т и никеля марки НП-2 с наложением ультразвука. Установлено, что снижение усилия в зависимости от скорости протягивания составляет 30...80 %. При деформировании с ультразвуком проволока в меньшей степени упрочняется и имеет высокие пластические свойства. Наложение ультразвука при последующем отжиге приводит к повышению пластических свойств проволоки при более низких температурах, устраняет разнородность и аномальный рост зерен в структуре стали и никеля после малых и критических степеней деформации [1, 19, 26, 72].

5. Исследован процесс ультразвукового волочения и термообработки проволоки из углеродистых сталей. Показано, что ультразвуковые колебания значительно ускоряют процессы диффузии, в результате при скоростях нагрева проволоки 250 град/с и выше не происходит смещения температуры рекристаллизации в высокотемпературную область и высокие пластические свойства сталей достигаются при более низких температурах отжига. Предложен способ термической обработки стальной проволоки перед волочением, включающий нагрев со скоростью 500...1000 град/с до 720...780°C, регламентированное охлаждение со скоростью 15...20 град/с до 550...600°C с наложением ультразвука, а затем ускоренное охлаждение водой. Предложенный способ позволил со-

вместить операцию термообработки и волочения проволоки в один технологический процесс. Разработана методика расчета максимальной температуры нагрева движущейся проволоки и кабеля с учетом тепловых потерь излучением, которая позволила повысить точность режимов электротермической обработки при волочении [1, 22, 25, 43, 44, 63, 114].

6. Исследован процесс волочения и скоростного электроконтактного отжига нагревостойкого кабеля с наложением ультразвуковых колебаний. Показано, что нагрев кабеля до температуры аустенизации (1000 - 1100°C) и охлаждение его перед волочением до 150-200°C увеличивает термодинамическую стабильность аустенита, приводит к торможению $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и снижает деформационное упрочнение стали. Разработана технология, обеспечивающая получение мелкозернистой структуры оболочки кабеля, что позволило снизить сопротивление деформации и увеличить единичные обжатия до 25-30 %.

Предложена и реализована технология разделки кабелей с минеральной изоляцией при изготовлении первичных преобразователей с помощью энергии ультразвука. Возбуждение на фиксированном участке кабеля изгибных колебаний позволило удалить изоляционный порошок и внешнюю оболочку в кабеле диаметром менее 200 мкм без повреждения внутренних жил.

Предложена и реализована технология ультразвуковой засыпки порошкового изоляционного материала при получении кабельной заготовки. Возбуждение в капиллярных или засыпочных трубках изгибных ультразвуковых колебаний позволило увеличить скорость засыпки порошка в 2 раза, полностью исключить пустоты в кабельной заготовке и обеспечить засыпку мелкодисперсного порошка с размером частиц до 2...4 мкм [8, 15, 33, 34, 36, 42, 48, 116, 118-120, 122, 123, 127].

7. Исследовано влияние ультразвука на процесс уплотнения неметаллических порошковых материалов. С помощью голографической интерферометрии показано, что при прессовании в ультразвуковом поле раньше достигается состояние, когда частицы порошка начинают двигаться упорядоченно, снижаются силы контактного трения между порошком и стенками матрицы. Разработан способ ультразвукового прессования, позволяющий повысить плотность образцов, снизить пористость и обеспечить более равномерное распределение пор по объему прессовки [9, 27, 68, 75, 129].

8. Проведен анализ брака свинцово-оловянистого припоя после прессования и его влияние на последующее волочения. С целью улучшения качества прессования заготовки предложено подвергать ее первоначальному волочению через роликовую волоку с обжатием 5 ± 20 % и последующему волочению на станах со скольжением. Для обнаружения и устранения брака при прессовании заготовки, обусловленного отсутствием канифоли в каналах, последнюю подвергали волочению с небольшими обжатиями и в зависимости от усилия волочения регулировали степень заполнения каналов канифолью [115, 125, 126].

9. Разработана математическая модель процесса волочения свинцово-оловянистых припоев с наполнителем. Установлено, что процесс волочения протекает стабильно при коэффициентах запаса прочности $\gamma \geq 2,5$ для проволоки диаметром более 5,0 мм; $\gamma \geq 2,7$ – для диаметров от 5,0 до 1,0 мм и $\gamma \geq 2,8$ – для диаметров менее 1,0 мм. Показано, что для проволоки большого диаметра единичные обжатия выше, чем для тонкой проволоки. Это явилось основанием для разработки технологии волочения с переменными единичными обжатиями по переходам и позволило повысить стабильность и производительность процесса за счет перераспределения суммарной работы деформации по маршруту. Получена эмпирическая формула и разработана методика для составления оптимального маршрута волочения на станах со скольжением с переменными обжатиями по переходам, обеспечивающая максимальную производительность процесса. Разработана методика оптимизации маршрута волочения припоя с использованием ультразвуковых колебаний через волноводы-волоки и волоки, запрессованные в пучности смещений волноводов [6, 7, 10, 20, 23, 28, 30-32, 35, 38, 101, 124].

10. Впервые в сплавах TiNi реализован эффект памяти формы под действием энергии ультразвука, т.е. инициировано обратное мартенситное превращение за счет энергии акустических колебаний. Обнаружено, что в сплавах с эффектом памяти формы ультразвуковые колебания, наряду со снижением напряжения пластического течения (эффект Лангенекера), вызывают и обратный эффект, связанный с превращением мартенсита в нестабильный аустенит под действием дополнительных акустических напряжений. Учет обнаруженных эффектов позволяет эффективно использовать ультразвук при разработке технологических процессов обработки сплавов с эффектом памяти формы. Исследованы и разработаны новые способы генерации реактивных механических напряжений и задания эффекта обратимой памяти формы с помощью энергии ультразвуковых колебаний [13, 14, 16, 21, 46, 47, 49-55, 128, 131-133].

На основании проведенных исследований разработаны технологии, оборудование и измерительная аппаратура для изготовления изделий из разнородных материалов и сплавов с эффектом памяти формы, экономический эффект от внедрения которых составляет более 650 тысяч у.е. в год.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии:

1. Артемьев В.В., Клубович В.В., Рубаник В.В. Ультразвук и обработка материалов. – Минск.: Экоперспектива, 2003.– 336 с.

Статьи в научных журналах:

2. Клубович В.В., Вагапов И.К., Рубаник В.В. Волочение тонкой проволоки через разъемную волоку с наложением ультразвука / Докл. Акад. наук БССР.– 1979.– Т. 23, № 5.– С. 448–451.

3. Клубович В.В., Рубаник В.В., Батвинков В.И. Волочение проволоки из мягких материалов с использованием ультразвуковых колебаний / Докл. Акад. наук БССР.– 1980.– Т. 24, № 5.– С. 426–429.

4. Рубаник В.В., Клубович В.В., Царенко Ю.В., Барановская Г.С. Влияние упругих напряжений на электросопротивление пластически деформированных ферромагнетиков // Докл. Акад. наук БССР.– 1981.– Т. 25, № 2.– С. 136–139.

5. Рубаник В.В., Бобров В.П. Автоматизация процесса обработки данных рентгенографического анализа // Заводская лаборатория.– 1987.– № 4.– С. 56.

6. Клубович В.В., Рубаник В.В., Княжище А.В., Буцукин В.С. Определение оптимального маршрута волочения проволоки с наложением ультразвука // Цветные металлы.– 1987.– № 11.– С. 86–87.

7. Рубаник В.В., Телепнев С.Н., Бобров В.П. Исследование работы колебательных систем методом голографической интерферометрии / Вестн. Акад. наук БССР, Сер. физ.-техн. наук.– 1990.– № 2.– С. 89–91.

8. Клубович В.В., Рубаник В.В., Бобров В.П., Телепнев С.Н. Разделка термомарного кабеля с помощью ультразвуковых колебаний // Вестн. Акад. наук Беларуси, Сер. физ.-техн. наук.– 1994.– № 2.– С. 36–38.

9. Клубович В.В., Высоцкий В.К., Бобровская Г.С., Рубаник В.В. Прессование порошков титаната бария с наложением ультразвуковых колебаний // Вестн. Акад. наук Беларуси, Сер. физ.-техн. наук.– 1994.– № 3.– С. 17–19.

10. Клубович В.В., Рубаник В.В., Филимоненков А.О., Княжище А.В. Расчёт усилия волочения свинцово-оловянистого припоя с канифольным наполнителем // Вестн. Акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук.– 1996.– № 3.– С. 45–50.

11. Клубович В.В., Рубаник В.В., Бобров В.П., Телепнев С.Н. Способ юстировки рентгеновских дифрактометров со схемой фокусировки по Бреггу-Брентано // Заводская лаборатория.– 1997.– № 1.– С. 25–26.

12. Дородейко В.Г., Рубаник В.В. Механическое поведение углеродистых сталей в процессе отпуска // Вестн. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук.– 1998.– № 2.– С. 8–11.

13. Рубаник В.В., Беляев С.П., Волков А.Е., Рубаник В.В. (мл.), Сидоренко В.В. Влияние ультразвука на деформационное поведение никелида титана // Вестн. Тамб. ун-та. Сер. естеств. и техн. наук.– 1998.– Т. 3, вып.3.– С. 265–266.

14. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Рубаник В.В. (мл.) Волочение и электротермическая обработка проволоки из никелида титана // Материалы. Технологии. Инструменты.– 2000.– Т. 5, № 4.– С. 80–83.

15. Клубович В.В., Царенко Ю.В., Рубаник В.В., Бобров В.П., Телепнев С.Н. Ультразвуковая технология производства кабелей в металлических оболочках // Материалы. Технологии. Инструменты.– 2002.– Т. 7, № 3.– С. 69–72.

16. Rubanik V.V., Klubovich V.V., Rubanik V.V., Jr. The ultrasounds initiation of SME // J. de Phys.– 2003.– Vol. 112, № IV.– P. 249–251.

Статьи в сборниках научных трудов:

17. Клубович В.В., Вагапов И.К., Рубаник В.В. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса волочения проволоки через разъемную волоку с ультразвуком // Повышение эффективности технологических процессов в поле акустических колебаний: Тематический сб. науч. тр. / МИСиС.– М.: Металлургия, 1981.– С. 109–112.

18. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Волочение проволоки в ультразвуковом поле с электроконтактным нагревом // Интенсификация технологических процессов в ультразвуковом поле: Тематический сб. науч. тр. / МИСиС.– М.: Металлургия, 1986.– С. 77–81.

19. Клубович В.В., Царенко Ю.В., Краузе В.Г. Волочение и отжиг стальной проволоки с наложением ультразвуковых колебаний // Применение физических и физико-химических методов в технологических процессах: Тематический сб. науч. тр. / МИСиС.– М.: Металлургия, 1990.– С. 98–102.

20. Рубаник В.В., Филимоненков А.О., Княжище А.В. Расчёт усилия волочения свинцово-оловянистого припоя с канифольным заполнением // Сб. науч. тр.– Витебск: ВГТУ, 1995.– Ч.2.– С. 125–129.

21. Рубаник В.В., Беляев С.П., Волков А.Е., Рубаник В.В.(мл.) Некоторые особенности пластического течения никелида титана под действием ультразвука // Современные энергоресурсосберегающие и экологобезопасные технологии в машиностроении и легкой промышленности: Сб. науч. тр.– Витебск: ВГТУ, 1998.– С. 139–144.

22. Рубаник В.В., Шмидт М.П., Яхновец А.А. Расчет температурного поля движущейся среды при электроконтактном нагреве // Тр. бел. гос. технолог. ун-та. Сер. издательское дело и полиграфия.– 2002.– №. 10.– С. 124–128.

Депонированные работы:

23. Рубаник В.В. Составление технологических маршрутов при волочении мягкой проволоки с наложением ультразвуковых колебаний / Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1986.– 9 с.– Деп. в ВИНТИ 01.07.86, № 4766–В86 // Весці Акад. навук БССР. Сер. фіз.-тэхн. н.– 1987.– № 3.– С. 118–119.

24. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Термоультразвуковой отжиг стальной проволоки/ Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1988.– 19 с.– Деп. в ВИНТИ 25.02.88, № 1545–В88// Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. н.– 1989.– № 1.– С. 114.

25. Клубович В.В., Рубаник В.В., Яхновец А.А. Расчет параметров электроконтактного нагрева с учетом теплоотдачи конвекций и теплоизлучением / Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1988.– 15 с.– Деп. в ВИНТИ 25.02.88, № 1546–В88 // Весці Акад. навук БССР. Сер. фіз.-тэхн. н.– 1989.– № 1.– С. 114.

26. Клубович В.В., Царенко Ю.В., Рубаник В.В. Скоростной отжиг проволоки из нержавеющей стали и никеля / Витеб. отд. ИФТТИП.– Витебск, 1988.– 18 с.– Деп. в ВИНТИ 01.12.88, № 8526–В88 // РЖ: 15И. Металловедение и термическая обработка.– 1989.– № 3.– ЗИ1247ДЕП.– С. 156.

27. Клубович В.В., Телепнев С.Н., Рубаник В.В., Бобров В.П. Исследование режимов работы ультразвуковых колебательных систем методом голографической интерферометрии / Витеб. отд. ИФТТИП.– Витебск, 1989.– 11 с.– Деп. в ВИНТИ 16.05.89, № 3244–В89 // РЖ: 18П. Акустика.– 1989.– № 8.– 8П103ДЕП.– С. 15.

28. Клубович В.В., Рубаник В.В., Княжище А.В., Мишук М.В. Влияние смазки, геометрии и материала волоочильного инструмента на процесс протягивания оловянно-свинцового припоя / Витеб. отд. ИФТТИП.– Витебск, 1989.– 14 с.– Деп. в ВИНТИ 25.07.89, № 5167–В89 // РЖ: 12. Металлургия.– 1990.– № 1.– 11Д34ДЕП.– С. 192.

29. Клубович В.В., Рубаник В.В., Бобров В.П., Телепнев С.Н. Прибор для измерения температуры внутри живых организмов / Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1991.– 17 с.– Деп. в ВИНТИ 11.04.91, № 894–В91 // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. біял. н.– 1991.– № 5.– С. 121.

30. Клубович В.В., Рубаник В.В., Княжище А.В., Шашмурин В.А. Волочение свинцово-оловянистого припоя с наполнителем / Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1991.– 11 с.– Деп. в ВИНТИ 29.04.91, № 1797–В91 // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. н.– 1991.– № 4.– С. 117.

31. Клубович В.В., Рубаник В.В., Княжище А.В., Шевалдыкина Л.Г. Выбор смазки при волочении свинцово-оловянистого припоя / Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1991.– 17 с.– Деп. в ВИНТИ 29.04.91, № 1798–В91 // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. н.– 1991.– № 4.– С. 117.

32. Клубович В.В., Рубаник В.В., Княжище А.В., Шашмурин В.А. Выбор рационального маршрута волочения свинцово-оловянистого припоя / Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1991.– 16 с.–Деп. в ВИНТИ 29.04.91, № 1799–В91 // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. н.– 1991.– № 4.– С. 117.

33. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Краузе В.Г. Скоростная электротермическая обработка кабеля / Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1991.– 10 с.– Деп. в ВИНТИ 06.05.91, № 1816–В91 // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. н.– 1992.– № 4.– С. 114.

34. Клубович В.В., Рубаник В.В., Краузе В.Г., Царенко Ю.В. Осколков Е.А. Установка электротермической обработки кабеля / Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1991.– 12 с.– Деп. в ВИНТИ 06.05.91, № 1817–В91 // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. н.– 1992.– № 4.– С. 114.

35. Рубаник В.В., Княжище А.В. Технология волочения свинцово-оловянистого припоя на станах со скольжением / Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1993.– 13 с.– Деп. в ВИНТИ 28.01.93, № 196–В93 // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. н.– 1993.– № 4.– С. 118.

36. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Бобров В.П. Исследование влияния ультразвука на фазовые превращения и структурные свойства нагревостойкого кабеля после волочения / Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1993.– 8 с.– Деп. в ВИНТИ 09.06.93, № 1562–В93 // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. н.– 1994.– № 3.– С. 122.

37. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Исследование магнитных свойств проволоки из стали 35 после скоростной термической обработки с наложением ультразвуковых колебаний / Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1994.– 8 с.– Деп. в ВИНТИ 10.03.94, № 569–В94 // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. н.– 1995.– № 2.– С. 116.

38. Клубович В.В., Рубаник В.В., Княжище А.В. Особенности волочения оловянно-свинцовой трубки, заполненной канифолью, и проволоки / Витеб. отд. ИФТТИП.– Мн., 1994.– 17 с.– Деп. в ВИНТИ 10.03.94, № 570–В94 // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. н.– 1995.– № 2.– С. 117.

Материалы научных конференций, семинаров и симпозиумов:

39. Клубович В.В., Рубаник В.В. Исследование эффективности волочения проволоки из мягких металлов в зависимости от способа подведения ультразвука к очагу деформации/ Tvarnenie visokymi parametrami – tehnologije tvarnenia: Medzinarodne sympozium, Bratislava, 1985.– Bratislava, CSVTS, 1985.– P. 35–43.

40. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Исследование процесса волочения с применением ультразвука и электроконтактного нагрева металла в очаге деформации // Tvarnenie visokymi parametrami – tehnologije tvarnenia: Medzinarodne sympozium, Bratislava, 1986.– Bratislava, CSVTS, 1986.– P. 44–48.

41. Klubovich V.V., Rubanick V.V. The perspectives of ultrasonic oscillations in drawing process of metals and alloys / Tvarnenie visokymi parametrami – tehnologije tvarnenia: Medzinarodne sympozium, Bratislava, 1986.– Bratislava, CSVTS, 1986.– P. 129–137.

42. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Применение ультразвуковых колебаний при волочении и термообработке композиционных материалов // Тенденции развития в технологии машиностроения: Матер. VI МНТК, Зелена Гура, 1990 г.: В 3 ч.– Зелена Гура, Польша, 1990.– Ч.2.– С. 45–49.

43. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Термоультразвуковая обработка стальной проволоки // Ультразвук в технологии машиностроения: Матер. междунар. конф., Архангельск, 1991 г.– Архангельск, 1991.– С. 99–103.

44. Klubovich V.V., Rubanick V.V., Tsarenko Y.V. The prospects of the ultrasound vibrations use in the processes of the materials heat treatment // Ultrasonics Word Congress: Proceedings Intern. Conference, Berlin, 3–7 September 1995.– Berlin, Germany, 1995.– P. 733–735.

45. Рубаник В.В., Дороейко В.Г., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Некоторые особенности волочения титан-никелевой проволоки с наложением продольных ультразвуковых колебаний // Материалы с эффектом памяти формы: Сб. докл. 1-го Рос.-Амер. семинара, СПб., 13–17 нояб. 1995 г.: В 3 ч.– СПб., 1995.– Ч. 1.– С. 76–77.

46. Klubovich V.V., Rubanick V.V., Likhachov V.A., Dorodeiko V.G., Rubanick V.V., Jr. Shape Memory Effect Generation in “nitinol” by Means of Ultrasound // Acoustoelectronics, Frequency control and signal generation: Proceedings Intern. Conference, Moscow, 17–19 Sept. 1996.– Moscow, 1996.– P. 38–42.

47. Klubovich V.V., Rubanick V.V., Dorodeiko V.G., Likhachov V.A., Rubanick V.V., Jr. Generation of shape memory effect in Ti-Ni alloy by means of ultrasound // Shape Memory and Superelastic Technologies: Engineering and Biomedical Applications: Proceedings II Intern. Conference, California, USA, 2–6 March 1997 / Ed. by A.Pelton, D.Hodgson, S.Russel, T.Duerig.- Asilomar, California, 1997.– P. 59-64.

48. Царенко Ю.В., Клубович В.В., Рубаник В.В. Применение ультразвуковых колебаний в процессе производства кабелей с минеральной изоляцией // Ультразвуковые технологические процессы – 98: Сб. докл. науч.-техн. конф, Москва, 2-6 февр. 1998 г. / под ред. В.М. Приходько.– Москва, 1998.– С. 171-174.

49. Беляев С.П., Вдовин Е.Д., Волков А.Е., Рубаник В.В., Сидоренко В.В., Рубаник В.В. (мл.) Моделирование акустопластического эффекта в никелиде титана // Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов: Матер. XXXV семинара «Актуальные проблемы прочности», Псков, 15–18 сент. 1999 г.: В 2 ч.– Псков, 1999.– Ч. II.– С. 569–576.

50. Rubanick V., Razov A., Rubanick V., Jr. Thermographic investigations of reverse martensitic transformation in TiNi under the action of ultrasound // Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Industrial Applications: Proceedings of the Intern. Symposium, Quebec, Canada, 22–26 Aug. 1999 / Edited by F.Trochu, V.Brailovski and A.Galibois.– Quebec, 1999.– P.283–287.

51. Rubanick V.V., Tsarenko Y.V., Rubanick V.V., Jr. The speed heat treatment of a TiNi wire // Shape Memory and Superelastic Technologies: Proceedings of the Intern. Conference, California, USA, 30 April–4 May 2000 / Edited by M. Russel, A. Pelton.– Asilomar, California, 2000.– P. 131–134.

52. Клубович В.В., Рубаник В.В., Рубаник В.В. (мл.) Инициирование эффектов мартенситной неупругости в TiNi сплаве с помощью ультразвуковых колебаний // Физика процессов деформации и разрушения и прогнозирование механического поведения материалов: Тр. XXXVI Междунар. семинара «Актуальные проблемы прочности», Витебск, 26–29 сент. 2000 г.: В 2 ч.– Витебск, 2000.– Ч. 2.– С. 710–712.

53. Беляев С.П., Волков А.Е., Рубаник В.В., Рубаник В.В. (мл.), Сидоренко В.В. Тепловое моделирование механического поведения TiNi при ультразвуковом нагружении // Структура и свойства перспективных материалов и сплавов: Тр. XL Междунар. семинара «Актуальные проблемы прочности», Великий Новгород, 30 сент.–4 окт. 2002 г.– Великий Новгород, 2003.– С. 25–28.

54. Рубаник В.В. мл., Рубаник В.В., Вьюненко Ю.Н. Ультразвуковое инициирование ЭПФ // Современные проблемы прочности: Науч. тр. VI Междунар. симпоз., Старая Русса, 20–24 окт. 2003 г.: В 2 т.– Великий Новгород, 2003.– Т. 2.– С. 54–57.

55. Беляев С.П., Рубаник В.В., Рубаник В.В. (мл.) Влияние знакопеременных механических напряжений на процессы пластичности превращения и памяти формы в TiNi // Актуальные проблемы прочности: Материалы XLIII Междунар. конф., Витебск, 27 сент.–1 окт. 2004 г.: В 2 ч.– Витебск, 2004.– Ч. 1.– С. 320–324.

56. Клубович В.В., Рубаник В.В., Бегунов М.А., Рубаник В.В. (мл.), Борозенцева Ю.Б. Изменение температуры резонансных образцов при ультразвуковом воздействии // Актуальные проблемы прочности: Материалы XLIII Междунар. конф., Витебск, 27 сент.–1 окт. 2004 г.: В 2 ч.– Витебск, 2004.– Ч. 1.– С. 336–340.

Тезисы докладов:

57. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Исследование физико-механических свойств стали после деформации с ультразвуком при высоких температурах разогрева // Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения: Тез. докл. междунар. симпоз.– Киев: Наукова думка, 1984.– С. 112–113.

58. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Исследование процесса волочения проволоки с электроконтактным нагревом в ультразвуковом поле // Электрофизико-химические и комбинированные методы обработки материалов: Тез. докл. к зональной конф.– Пенза, 1984.– С. 45–46.

59. Клубович В.В., Рубаник В.В., Яхновец А.А., Царенко Ю.В. Расчет температуры проволоки в очаге деформации при волочении // Прогрессивные процессы обработки материалов давлением: Тез. докл. НТК.– Минск, 1985.– С. 73–74.

60. Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Краузе В.Г., Сытников А.В., Макарихин В.М. Ультразвуковое волочение стальной проволоки // Автоматизация процессов обработки материалов давлением: Тез. докл. зональной конф.– Пенза, 1986.– С. 14–15.

61. Рубаник В.В., Телепнев С.Н. Определение распределения амплитуд смещений ультразвуковых колебательных систем // Голография в промышленности и научных исследованиях: Тез. докл. науч.-практич. семинара.– Гродно, 1986.– С. 21.

62. Клубович В.В., Рубаник В.В., Княжище А.В. Оптимизация маршрута волочения проволоки с наложением ультразвуковых колебаний // Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов: Тез. докл. VI Всес. науч.-техн. конф.– М.: МИСиС, 1987.– С. 104–105.

63. Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Краузе В.Г. Волочение и отжиг стальной проволоки с наложением ультразвуковых колебаний // Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов: Тез. докл. VI Всес. науч.-техн. конф.– М.: МИСиС, 1987.– С. 116.

64. Рубаник В.В., Бобров В.П., Клубович В.В. Изготовление пьезоэлектрических волок // Актуальные проблемы получения и применения сегнето- и пьезо-

электрических материалов и их роль в ускорении научно-технического прогресса: Тез. докл. III Всесоюз. конф.– М, 1987.– С. 106.

65. Клубович В.В., Рубаник В.В. Применение ультразвуковых колебаний в процессах волочения металлов и сплавов // Пластическая деформация материалов в условиях внешних энергетических воздействий: Тез. докл. Всесоюз. семинара.– Новокузнецк, 1988.– С. 139-140.

66. Клубович В.В., Рубаник В.В., Телепнев С.Н., Бобров В.П. Исследование характера колебаний пьезокерамических материалов с помощью голографической интерферометрии // Акустические средства исследования океана: Тез. докл. V Дальневосточной акустической конф.– Владивосток, 1989.– С. 26–27.

67. Клубович В.В., Рубаник В.В., Телепнев С.Н., Бобров В.П. Применение голографической интерферометрии для исследования процесса волочения с наложением ультразвуковых колебаний // Методы и применение голографической интерферометрии: Тез. докл. Всесоюз. симпоз.– Куйбышев, 1990.– С. 39–40.

68. Клубович В.В., Рубаник В.В., Абарбанель З.И., Бобровская Г.С., Высоцкий В.К. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на процесс прессования керамического порошка методом голографической интерферометрии // VI Всесоюз. конф. по голографии: Тез. докл.– Витебск, 1990.– С. 160–161.

69. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Скоростная электротермическая обработка кабеля // Повышение эффективности и качества механообрабатывающего производства: Тез. докл. конф.– Евпатория, 1993.– С. 62-63.

70. Клубович В.В., Рубаник В.В. Волочение композиционной проволоки с наложением ультразвуковых колебаний // Повышение эффективности и качества механообрабатывающего производства: Тез. докл. конф.– Евпатория, 1993.– С. 63.

71. Рубаник В.В., Высоцкий В.К., Бобровская Г.С. Синтез титаната бария в ультразвуковом поле // Колебания и волны в экологии, техпроцессах и диагностике: Тез. докл. междунар. конф.– Минск, 1993.– С. 112.

72. Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Бобров В.П. Фазовые превращения и структурные свойства нагревостойкого кабеля после волочения с ультразвуком // Колебания и волны в экологии, техпроцессах и диагностике: Тез. докл. междунар. конф.– Минск, 1993.– С. 113.

73. Клубович В.В., Рубаник В.В., Рубаник В.В. (мл.), Филимоненков А.О. Расчёт усилий при волочении оловянно-свинцового припоя с наложением ультразвуковых колебаний // Ультразвуковая техника и технология: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф.– Минск, 1995.– С. 38–39.

74. Рубаник В.В., Филимоненков А.О., Княжище А.В. Расчёт усилия волочения свинцово-оловянистого припоя с канифольным заполнением // Междунар. 51 НТК БГПА: Материалы конф.: В 8 ч.– Минск, 1995.– Ч. 8.– С. 91-92.

75. Klubovich V.V., Visotskij N.K., Rubanick V.V., Bobrovskaya G.S. The impact of ultrasound vibrations on pressing process and the properties of barium titanate ceramic // World Congress on Ultrasonics: Abstracts.– Berlin, 1995.– P. 135.

76. Клубович В.В., Рубаник В.В., Лихачев В.А., Рубаник В.В., Дородейко В.Г. Иницирование эффекта памяти формы в никелиде титана с помощью ультразвука // Актуальные проблемы прочности: Тез. докл. XXXII семинара.– С.Петербург, 1996.– С. 90.

77. Клубович В.В., Рубаник В.В. Использование ультразвуковых колебаний в процессах волочения и термообработки // Физика и техника ультразвука: Тез. докл. науч.-техн. конф.– С.Петербург, 1997.– С. 125-126.

78. Рубаник В.В., Бегунов М.А., Царенко Ю.В. Моделирование процесса электроконтактного отжига движущейся проволоки // XXXII науч.-техн. конф. Преподавателей и студентов ВГТУ: Тез. докл. / ВГТУ.– Витебск, 1999.– С. 45.

79. Рубаник В.В., Клубович В.В., Рубаник В.В. (мл.) Особенности ультразвукового иницирования фазовых мартенситных превращений в TiNi // Междунар. 53 НТК БГПА: Материалы конф.: В 10 ч.– Минск, 1999.– Ч. 2.– С. 69.

80. Клубович В.В., Рубаник В.В., Рубаник В.В. (мл.) Влияние ультразвуковых колебаний на процесс генерации реактивных напряжений в TiNi // Материалы и технологии – 2000: Тез. докл. 4 респуб. науч.-техн. конф., Гомель, 12–13 сент. 2000 г. / Ин-т механики металлополимерных систем им. В.А. Белого.– Гомель, 2000.– С. 175–176.

81. Klubovich V., Rubanik V., Rubanik V., Jr. Ultrasound TiNi-wire drawing // 7th European Conference on Advanced Materials and Processes EUROMAT 2001: Abstracts, Rimini, 10-14 June 2001.– Rimini, Italy, 2001.– P. 373.

82. Рубаник В.В., Вьюненко Л.Ф., Вьюненко Ю.Н., Клубович В.В., Рубаник В.В. (мл.) Управление формовосстановлением сплавов с памятью формы ультразвуковыми колебаниями // Актуальные проблемы прочности: Тез. докл. XXXVI междунар. семинара, Киев, 3–5 июля 2001 г.– Киев, 2001.– С. 181–182.

83. Рубаник В.В., Рубаник В.В. (мл.), Шушкевич В.Л., Бегунов М.А. Индуктивный метод контроля формовосстановления сплавов с ЭПФ // XXXV науч.-техн. конф. препод. и студ.: Тез. докл. / УО «ВГТУ».– Витебск, 2002.– С. 25.

84. Rubanik V.V., Klubovich V.V., Rubanik V.V., Jr. The ultrasounds initiation of SME // 10th International conference on martensitic transformations ICOMAT'02: Book of abstracts, Espoo, 9–14 June 2002 / Helsinki university of technology.– Espoo, Finland, 2002.– P. 241.

85. Беляев С.П., Рубаник В.В., Рубаник В.В. (мл.), Сидоренко В.В. Влияние ультразвуковых колебаний на процессы генерации и релаксации напряжений в сплаве TiNi. // Дефекты структуры и прочность кристаллов: Тез. докл. Всероссийской конф.– Черногоровка, 2002.– С. 104.

86. Рубаник В.В., Клубович В.В., Рубаник В.В. (мл.) Формирование малых петель в TiNi при фазовом превращении за счет наложения ультразвука // XIV Петербургские чтения по проблемам прочности: Сб. тез., СПб., 12–14 марта 2003 г.– СПб., 2003.– С. 261–262.

87. Рубаник В.В., Бегунов М.А., Борозенцева Ю.Б., Рубаник В.В. (мл.) Компьютерное моделирование изменения температуры образца при ультразву-

ковом воздействии // XXXVII науч.-техн. конф. препод. и студ. университета: Тез. докл. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2004. – С. 30.

88. Рубаник В.В., Клубович В.В., Рубаник В.В. (мл.) Формовосстановление TiNi с памятью формы подвергнутых ультразвуковой обработке // Актуальные проблемы прочности: Материалы XLII Междунар. конф. Калуга, 26–29 мая 2004 г. – Калуга, 2004. – С. 136.

89. Rubanik V., Klubovich V., Rubanik V., Jr., Jezhora A. Shape memory effect due to ultrasound induced martensitic transformation in Ti-Ni alloys // Shape memory and superelastic technology: Abstracts, Baden-Baden, 3-7 Oct. 2004. – Baden-Baden, Germany, 2004. – P. 172.

Информационные листки:

90. Клубович В.В., Рубаник В.В., Краузе В.Г., Царенко Ю.В., Пашкевич Н.В. Ультразвуковой волочильный стан: Информационный листок / Витеб. центр науч.-техн. информ. – Витебск, 1986. – № 86-3. – 3 с.

91. Рубаник В.В., Бобровская Г.Е., Телешнев С.Н., Бобров В.П. Установка голографическая: Информ. листок / Витеб. центр НТИ. – Витебск, 1987. – № 87-06. – 3 с.

92. Рубаник В.В., Клубович В.В., Краузе В.Г., Пашкевич Н.В., Царенко Ю.В. Яхновец А.А. Устройство для термообработки тонкой проволоки на проход: Информационный листок / Витеб. центр НТИ. – Витебск, 1987. – № 87-27. – 3 с.

93. Клубович В.В., Рубаник В.В., Бобров В.П., Телешнев С.Н. Электронный счетчик длины СДЭ-1: Информационный листок / Витеб. центр науч.-техн. информ. – Витебск, 1991. – № 91-9. – 3 с.

94. Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Краузе В.Г., Тясто М.В. Высокотемпературная вакуумная печь: Информационный листок / Витеб. центр науч.-техн. информ. – Витебск, 1991. – № 91-12. – 3 с.

95. Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Краузе В.Г. Пирометрический измеритель температуры: Информационный листок / Витеб. центр науч.-техн. информ. – Витебск, 1991. – № 91-25. – 3 с.

Авторские свидетельства и патенты:

96. А.с. 648301 СССР, МКИ² В 21 С 3/00. Устройство для волочения металла с наложением продольных ультразвуковых колебаний на инструмент / В.В. Клубович, В.В. Рубаник (СССР). – № 2505604/22-02; Заявлено 05.07.77; Опубл. 25.02.79, Бюл. № 7 // Открытия. Изобретения. – 1979. – № 7. – С. 33.

97. А.с. 660756 СССР, МКИ² В 21 F 3/00. Способ обработки материалов / В.В. Клубович, Л.К. Конышев, В.В. Рубаник (СССР). – № 2538383/25-12; Заявлено 01.11.77; Опубл. 05.05.79, Бюл. № 17 // Открытия. Изобретения. – 1979. – № 17. – С. 33.

98. А.с. 668732 СССР, МКИ² В 21 С 3/00. Устройство для волочения материала с применением ультразвуковых колебаний через две волокна / В.В. Клу-

бович, В.В. Рубаник (СССР).— № 2569387/22-02; Заявлено 12.01.78; Опубл. 25.06.79, Бюл. № 23 // Открытия. Изобретения.— 1979.— № 23.— С. 23.

99. А.с. 778853 СССР, МКИ³ В 21 С 3/00. Устройство для волочения металла с использованием ультразвуковых колебаний / В.В. Клубович, В.В. Рубаник (СССР).— № 2685127/22-02; Заявлено 16.11.78; Опубл. 15.11.80, Бюл. № 42 // Открытия. Изобретения.— 1980.— № 42.— С. 30.

100. А.с. 796749 СССР, МКИ³ G 01 N 27/84. Способ выявления поверхностных дефектов / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко (СССР).— № 2731067/25-28; Заявлено 01.03.79; Опубл. 15.01.81, Бюл. № 2 // Открытия. Изобретения.— 1981.— № 2.— С. 191.

101. А.с. 831263 СССР, МКИ³ В 21 С 3/02. Устройство для волочения с наложением ультразвуковых колебаний на инструмент / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, В.К. Высоцкий (СССР).— № 2818592/22-02; Заявлено 25.05.79; Опубл. 23.05.81, Бюл. № 19 // Открытия. Изобретения.— 1981.— № 19.— С. 28.

102. А.с. 852397 СССР, МКИ³ В 21 С 3/00. Устройство для волочения металла с использованием ультразвуковых колебаний / В.В. Клубович, Г.С. Дробашевский, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко (СССР).— № 2816826/22-02; Заявлено: 07.09.79; Опубл. 30.07.81, Бюл. № 29 // Открытия. Изобретения.— 1981.— № 29.— С. 36.

103. А.с. 1014621 СССР, МКИ³ В 21 С 3/00. Устройство для волочения металла через две волокна с воздействием ультразвуковыми колебаниями / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Г.С. Барановская (СССР).— № 3360833/22-02; Заявлено 04.12.81; Опубл. 30.04.83, Бюл. № 16 // Открытия. Изобретения.— 1983.— № 16.— С. 32.

104. А.с. 1022044 СССР, МКИ³ G 01 N 29/00. Способ неразрушающего контроля механических свойств металлических протяженных изделий / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко Г.С. Барановская, Г.С. Дробышевский (СССР).— № 3366871/25-28; Заявлено 23.12.81; Опубл. 07.06.83, Бюл. № 21 // Открытия. Изобретения.— 1983.— № 21.— С. 130.

105. А.с. 1103920 СССР, МКИ³ В 21 С 3/00. Устройство для волочения металла с наложением ультразвуковых колебаний на инструмент / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко, А.А. Котов (СССР).— № 3590156/22-02; Заявлено 14.03.83; Опубл. 23.06.84, Бюл. № 27 // Открытия. Изобретения.— 1984.— № 27.— С. 23.

106. А.с. 1161211 СССР, МКИ⁴ В 21 С 3/14. Устройство для волочения проволоки с электроконтактным нагревом / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко (СССР).— № 3584494/22-02; Заявлено 27.04.83; Опубл. 15.06.85, Бюл. № 22 // Открытия. Изобретения.— 1985.— № 22.— С. 54.

107. А.с. 1218543 СССР, МКИ⁴ В 21 С 3/00. Устройство для деформации металлов с наложением ультразвука на инструмент / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко, А.А. Котов (СССР).— № 3644366/22-02; Заявлено 21.09.83; За-рег. 15.11.85; Не публ.

108. А.с. 1223488 СССР, МКИ⁴ В 21 С 1/00. Устройство для волочения металла с наложением ультразвуковых колебаний / В.В. Клубович, В.В. Рубаник,

В.С. Буцукин, Н.Н. Писменный, А.А. Котов (СССР).– № 3520450/22-02; Заявлено 10.12.82; Зарег. 08.12.85; Не публ.

109. А.с. 1324158 СССР, МКИ⁴ В 21 С 1/00. Устройство для волочения металла с наложением ультразвуковых колебаний / В.В. Клубович, В.В. Рубаник (СССР).– № 3748566/25-27; Заявлено 08.06.84; Зарег. 15.03.87; Не публ.

110. А.с. 1380020 СССР, МКИ⁴ В 21 С 3/00. Устройство для волочения металла с наложением ультразвуковых колебаний / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко (СССР).– № 3892137/31-02; Заявлено 05.05.85; Зарег. 08.11.87; Не публ.

111. А.с. 1387260 СССР, МКИ⁴ В 21 С 3/00. Устройство для деформации металлов с наложением ультразвука на инструмент / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко (СССР).– № 4033520; Заявлено 03.03.86; Зарег. 08.12.87; Не публ.

112. А.с. 1448470 СССР, МКИ⁴ В 21 С 3/00. Устройство для деформации металлов с электроконтактным нагревом / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко, В.Г. Краузе, А.А. Яхновец (СССР).– № 4019937/31-02; Заявлено 05.02.87; Зарег. 01.09.88; Не публ.

113. А.с. 276406 СССР, МКИ³ В 21 С 15/00. Способ волочения проволоки и устройство для его осуществления / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко, В.Г. Краузе, В.А. Гушин, Е.А. Осколков, В.Е. Суслов, (СССР).– № 3176971; Заявлено 03.07.87; Зарег. 01.06.88; Не публ.

114. А.с. 1453905 СССР, МКИ⁴ С 21 D 1/78. Способ термической обработки проволоки перед волочением / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко (СССР).– № 4276487/31-02; Заявлено 06.07.87; Зарег. 22.09.88; Не публ.

115. А.с. 1563938 СССР, МКИ⁵ В 23 К 35/40. Способ контроля трубчатого припоя / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, А.В. Княжище, В.С. Буцукин, Э.В. Кондрацкий (СССР).– № 4404215/31-27; Заявлено 01.03.88; Опубл. 15.05.90; Бюл. № 18 // Открытия. Изобретения.– 1990.– № 18.– С. 79.

116. А.с. 288911 СССР, МКИ³ В 25 J 15/00. Устройство для изготовления кабельной заготовки / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, В.Г. Краузе, Е.А. Осколков, В.Е. Суслов, В.А. Гушин (СССР).– № 3195818/27-02; Заявлено 04.04.88; Зарег. 01.02.89; Не публ.

117. А.с. 1614878 СССР, МКИ⁵ В 21 С 3/00. Устройство для волочения металла с наложением на инструмент ультразвуковых колебаний / В.Г. Краузе, В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко, В.Е. Суслов, Е.А. Осколков, В.А. Гушин (СССР).– № 4483621/27-02; Заявлено 13.07.88; Опубл. 23.12.90, Бюл. № 47 // Открытия. Изобретения.– 1990.– № 47.– С. 25.

118. А.с. 311188 СССР, МКИ³ В 21 С 1/00. Способ изготовления жаростойкого кабеля / Ю.В. Царенко, В.В. Клубович, В.В. Рубаник, В.Г. Краузе, Е.А. Осколков, В.Е. Суслов (СССР).– № 4500919; Заявлено 31.10.88; Зарег. 02.04.90; Не публ.

119. А.с. 302736 СССР, МКИ³ В 21 С 3/00. Устройство для волочения кабелей с минеральной изоляцией / В.В. Клубович, В.В. Рубаник С.Н. Телепнев, В.П. Бобров, В.А. Гушин, Е.А. Осколков, В.Е. Суслов (СССР).– № 4505117; Заявлено 26.12.88; Зарег. 02.10.89; Не публ.

120. А.с. 311537 СССР, МКИ³ В 21 С 3/02. Способ заполнения кабельной заготовки порошковым материалом / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко, В.Г. Краузе, В.А. Гушин, Е.А. Осколков, В.Е. Суслов, Г.С. Бобровская (СССР).– № 4511293; Заявлено 27.03.89; Зарег. 02.04.90; Не публ.

121. А.с. 1629129 СССР, МКИ⁵ В 21 С 1/00, 3/00. Способ изготовления волновода-волокни / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, С.Н. Телепнев, Г.С. Бобровская (СССР).– № 4616700/02; Заявлено 05.12.88; Оpubл. 23.02.91, Бюл. № 7 // Открытия. Изобретения.– 1991.– № 7.– С. 42.

122. А.с. 1640768 СССР, МКИ⁵ Н 02 G 1/12. Способ разделки кабеля / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, С.Н. Телепнев, В.П. Бобров (СССР).– № 4621593/07; Заявлено 19.12.88; Оpubл. 07.04.91, Бюл. № 13 // Открытия. Изобретения.– 1991.– № 13.– С. 213.

123. А.с. 1767597 СССР, МКИ⁵ Н 02 G 1/12. Устройство для разделки термостойкого кабеля / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, С.Н. Телепнев, В.П. Бобров (СССР).– № 4822892/07; Заявлено 03.05.90; Оpubл. 07.10.92, Бюл. № 37 // Открытия. Изобретения.– 1992.– № 37.– С. 194.

124. А.с. 1810147 СССР, МКИ⁵ В 21 С 1/00. Способ многократного волочения композиционной проволоки преимущественно из сплава олово-свинец / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, А.В. Княжище, С.В. Варагин, Л.Г. Щербатюк (СССР).– № 4936707/27; Заявлено 16.05.91; Оpubл. 23.04.93; Бюл. № 15 // Открытия. Изобретения.– 1993.– № 15.– С. 19.

125. А.с. 1810148 СССР, МКИ⁵ В 21 С 1/00. Способ волочения проволоки из сплава олово-свинец / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, А.В. Княжище, С.В. Варагин (СССР).– № 4949030/27; Заявлено 25.06.91; Оpubл. 23.04.93; Бюл. № 15 // Открытия. Изобретения.– 1993.– № 15.– С. 19.

126. А.с. 1810151 СССР, МКИ⁵ В 21 С 3/00. Волокна для деформации изделий преимущественно из свинцово-оловянистых сплавов / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, А.В. Княжище, Л.Г. Щербатюк (СССР).– № 4947250/27; Заявлено 18.06.91; Оpubл. 23.04.93; Бюл. № 15 // Открытия. Изобретения.– 1993.– С.19-20.

127. Пат. 2060852 РФ, МКИ⁶ В 21 С 3/00. Способ волочения нагревостойкого кабеля / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко (РФ).– № 92015653/02; Заявлено 30.12.92; Оpubл. 27.05.96; Бюл. № 15 // Изобретения.– 1996.– № 15.– С. 28.

128. Пат. 2413 С2 ВУ, МПК С 21D 8/00, С 22F 3/00. Способ иницирования эффекта памяти формы / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, В.Г. Дородейко, В.В. Рубаник (мл.), Ю.В. Царенко.– № 960348; Заявл. 05.07.1996; Оpubл. 30.09.1998 // Афицыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь.– 1998.– № 3 (18).– С.176-177.

129. Пат. 2007272 РФ, МКИ⁵ В 22 F 3/02. Способ прессования порошкового материала / В.В. Клубович, Г.С. Бобровская, В.В. Рубаник, В.К. Высоцкий (РФ).– № 4892743/02; Заявлено 19.12.90; Оpubл. 15.02.94; Бюл. № 3 // Изобретения.– 1994.– № 3.– С. 87.

130. Пат. 2114420 РФ, МКИ⁶ G 01 № 23/20. Способ юстировки дифрактометра / В.В. Клубович, В.П. Бобров, В.В. Рубаник, С.Н. Телепнев (РФ).– № 92011857/25; Заявлено 14.12.92; Оpubл. 27.06.98; Бюл. № 18 // Изобретения.– 1998.– № 18.– С. 171.

131. Пат. 4065 С2 ВУ, МПК В 01J 19/10, С 21D 1/04. Способ генерации реактивных напряжений в материалах с эффектом памяти формы / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.), Ю.В. Царенко, А.Е. Волков, С.П. Беляев.– № 19980546; Заявл. 05.06.1998; Оpubл. 30.09.2001 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь.– 2001.– № 3 (30).– С. 104.

132. Пат. 4133 С2 ВУ, МПК С 21D 1/04, 7/02, В 06В 1/00. Способ создания обратимого эффекта памяти формы / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, В.Г. Доройко, В.В. Рубаник (мл.), Ю.В. Царенко.– № 961194; Заявл. 31.12.1996; Оpubл. 30.12.2001 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь.– 2001.– № 4 (31).– С. 155.

133. Пат. 4134 С2 ВУ, МПК С 21D 1/04, 7/02, В 06В 1/00. Способ создания обратимого эффекта памяти формы / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, В.Г. Доройко, В.В. Рубаник (мл.), Ю.В. Царенко.– № 970051; Заявл. 06.02.1997; Оpubл. 30.12.2001 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь.– 2001.– № 4 (31).– С. 155.

РЕЗЮМЕ

Рубаник Василий Васильевич

НОВЫЕ СПОСОБЫ И ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Ключевые слова: ультразвук, волочение, термообработка, прессование, эффект памяти формы, формовосстановление, термоупругое мартенситное превращение, никелид титана, напряжения.

Объектом исследования являются технологические процессы формообразования изделий из разнородных материалов и сплавов с эффектом памяти формы с применением УЗК. *Предметом* исследования являются закономерности влияния ультразвука на параметры технологических процессов формообразования и свойства изделий.

Целью работы является исследование закономерностей совместного пластического деформирования разнородных материалов, сплавов с эффектом памяти формы и разработка на их основе новых способов, технологий и оборудования для формообразования изделий с использованием ультразвуковых колебаний.

Разработаны научные и технологические основы совместного пластического деформирования разнородных материалов и сплавов с эффектом памяти формы. Разработаны новые способы подведения ультразвука к очагу деформации и исследовано влияние ультразвуковых колебаний на процессы волочения, термообработки за счет электроконтактного нагрева, заполнения и прессования порошковых материалов, разделки кабелей с минеральной изоляцией в металлической оболочке, а также свойства получаемых материалов.

Впервые обнаружено явление инициирования памяти формы в TiNi сплавах только за счет энергии ультразвуковых колебаний, а также аномальный рост величины напряжения течения материала при ультразвуковом воздействии.

Предложены новые способы инициирования эффекта памяти формы, генерации реактивных напряжений, задания обратимой памяти формы за счет энергии ультразвуковых колебаний. Предложена модель, объясняющая эффекты ультразвукового воздействия на сплавы с эффектом памяти формы.

На основе результатов исследований и установленных закономерностей разработаны новые способы и технологии ультразвуковой обработки материалов, спроектировано и изготовлено оборудование для получения свинцово-оловянистых припоев, кабелей в металлической оболочке с минеральной изоляцией, TiNi сплавов. Экономический эффект от внедрения разработок составляет сумму, эквивалентную более 650000 \$ в год.

РЭЗЮМЕ

Рубанік Васілій Васільевіч

НОВЫЯ СПАСАБЫ І ТЭХНАЛОГІІ ЎЛЬТРАГУКАВАЙ АПРАЦОЎКІ МАТЭРЫЯЛАЎ

Ключавыя словы: ультрагук, валачэнне, тэрмаапрацоўка, прасаванне, з'ява памяці формы, формааднаўленне, тэрмапругкае мартэнсітнае ператварэнне, нікелід тытану, напружанні.

Аб'ектам даследавання з'яўляліся тэхналагічныя працэсы формаўтварэння вырабаў з разнародных матэрыялаў і сплаваў, якія валодаюць з'явай памяці формы з прымяненнем ўльтрагукавых ваганяў. *Прадметам* даследавання з'яўляліся заканамернасці ўплыву ўльтрагука на параметры тэхналагічных працэсаў формаўтварэння і ўласцівасці вырабаў.

Мэтай работы працы з'яўлялася ўстанаўленне заканамернасцей сумеснага дэфармавання разнародных матэрыялаў, сплаваў з эфектам памяці формы і распрацоўка на іх аснове новых спосабаў, тэхналогій і абсталявання для формаўтварэння вырабаў з выкарыстаннем ультрагукавых ваганяў.

Распрацаваны навыковыя і тэхналагічныя асновы сумеснага пластычнага дэфармавання разнародных матэрыялаў і сплаваў з эфектам памяці формы. Распрацаваны новыя спосабы падвядзення ўльтрагука да ачага дэфармацыі і даследавання ўздзеяння ўльтрагукавых ваганяў на працэсы валачэння, тэрмаапрацоўкі залік электракантактнага нагрэву, запаўнення і прэсавання парашковых матэрыялаў, раздзелу кабеляў з мінеральнай ізаляцыяй у металічнай абалонцы, а таксама ўласцівасці атрыманых матэрыялаў.

Упершыню выяўлена з'ява ініцыявання памяці формы у TiNi сплавах толькі залік энергіі ўльтрагукавых ваганяў, а таксама аномальны рост велічыні напружвання цячэння матэрыялу пры ўльтрагукавым уздзеянні.

Прапанаваны новыя спосабы ініцыявання з'явы памяці формы, генерацыі рэактыўных напружванняў, заданне зваротнай памяці формы залік энергіі ўльтрагукавых ваганяў. Прапанавана мадэль, якая тлумачыць эфект ультрагукавага ўздзеяння на сплавы з эфектам памяці формы.

На аснове вынікаў даследаванняў і вызначаных заканамернасцей распрацаваны новыя спосабы і тэхналогіі ўльтрагукавай апрацоўкі матэрыялаў, спраектавана і выраблена абсталяванне для атрымання свінцова-алавяністых прыпоўў, кабеляў у металічнай абалонцы з мінеральнай ізаляцыяй, TiNi сплаваў. Эканамічны эфект ад укаранення распрацовак складае суму, эквівалентную больш за 650 000 \$ у год.

SUMMARY

Rubanik Vasily Vasilievich

NEW METHODS AND TECHNOLOGIES FOR ULTRASOUND TREATMENT OF MATERIALS

Keywords: ultrasound, drawing, thermal treatment, pressing, shape memory effect, shape restoration, thermoplastic martensite transformation, TiNi, stresses.

The object of the investigation is technological processes of shape restoration of products from heterogeneous materials and SME alloys with the use of ultrasound. *The subject* of the investigation is mechanisms of ultrasound influence on the parameters of the processes of shape restoration and properties of products.

The aim of the work is to investigate mechanisms of joint plastic deforming of heterogeneous materials, SME alloys and to develop, on their basis, new methods, technologies and equipment for shape restoration of products with the use of ultrasonic vibration.

Scientific and technological foundation of joint plastic deforming of heterogeneous materials and SME alloys are developed. New methods for supplying ultrasound to the place of deformation are developed and one investigated the influence of ultrasonic vibration on the processes of drawing, thermal treatment due to electro contact heating, filling and pressing of powdery materials, termination of mineral-insulated metal-sheathed cables and the properties of the received materials as well.

For the first time, one discovered the initiation of shape memory in TiNi alloys only due to the energy of ultrasonic vibration, and also an abnormal growth of the value of material flow stress at ultrasound influence.

New methods for initiating shape memory effect, generating reactive stresses, setting the reversible shape memory due to the energy of ultrasonic vibration are suggested. The model, explaining effects of ultrasound influence on SME alloys is suggested.

On the basis of the results of the investigation and determined mechanisms, new methods and technologies for ultrasound treatment of materials are developed. The equipment for producing lead-tin solders, mineral-insulated metal-sheathed cables, TiNi alloys are designed and made. The economical effect of introducing the developments makes up more than 650000 \$ a year.



Рубаник Василий Васильевич

**НОВЫЕ СПОСОБЫ И ТЕХНОЛОГИИ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

**05.03.01 – технологии и оборудование механической
и физико-технической обработки**

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Подписано в печать 02.05.2005. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная № 1
Печать ризографическая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 2,7. Уч.-изд. л. 1,9.
Тираж 100 экз. Заказ 224.

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Витебский государственный технологический университет».
Лицензия № 02 330/0133005 от 1 апреля 2004 г.
210035, Витебск, Московский пр., 72.